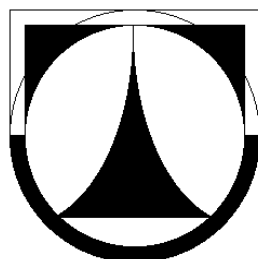


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**



**LIBEREC 2008**

**IVETA VYSKOČILOVÁ**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**

Studijní program: M3106 Textilní inženýrství

Studijní obor: Netkané textilie

Katedra netkaných textilií

**VLIV VELIKOSTI PLOCHY MEMBRÁNY NA  
REZONANCI SYSTÉMU**

**THE EFFECT OF SIZE OF MEMBRANE SURFACE ON  
SYSTEM RESONANCE**

Autor(ka): Iveta Vyskočilová

Vedoucí diplomové práce: Ing. Klára Kalinová, Ph.D.

**Rozsah práce**

Počet stran textu:	100
Počet obrázků:	72
Počet tabulek:	17
Počet příloh:	10

Technická univerzita v Liberci

Fakulta textilní

Katedra netkaných textilií

Školní rok 2007/ 2008

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Pro: **Ivetu Vyskočilovou**

obor: 3106-T004 Netkané textilie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Vliv velikosti plochy membrány na rezonanci systému**

Zásady pro vypracování:

- 1) prostudujte teoretické poznatky o zvukově pohltivém chování rezonančních membrán, fólií a vláknenných materiálů
- 2) připravte sérii vzorků: nanovláknenné vrstvy různých plošných hmotností, zvlákněné na podkladový materiál, zajišťující různou velikost kmitající plochy membrány
- 3)
  - a) proměřte frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti vzorků v závislosti na plošné hmotnosti nanovláknenných vrstev
  - b) proměřte frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti vzorků v závislosti na velikosti kmitající plochy nanovláknenné vrstvy
- 4) diskutujte závěry
  - a) vliv parametrů vzorků na průběh frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti
  - b) vliv parametrů vzorků na frekvence, při kterých dosahuje činitel zvukové pohltivosti maximálních hodnot

## Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní, a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 12. května 2008

.....

Podpis

## **Poděkování**

*Ráda bych poděkovala vedoucí diplomové práce Ing. Kláře Kalinové, Ph.D., za odborné vedení, mnoho cenných rad a připomínek, ale hlavně za její vstřícný přístup a trpělivost při vzniku této práce. Dále bych chtěla poděkovat svým rodičům za jejich podporu a lásku.*

## ANOTACE

Tato diplomová práce studuje zvukově pohltivé vlastnosti nanovláknenné vrstvy. V teoretické části se zabývá problematikou zvuku jako fyzikálního jevu, zejména činitelem zvukové pohltivosti, a metodami, kterými ho lze měřit. Dále se zabývá mechanikou pohlcování zvuku různými materiály. V další části práce neboli části experimentální je věnována pozornost zvukově pohltivým vlastnostem nanovláknenných vrstev vyrobených z roztoku polyvinylalkoholu o různých plošných hmotnostech. Nanovrstvy jsou nanесeny jednak na mřížky ze skleněných vláken o různých velikostech ok, a jednak na papírová mezikruží o různých tloušťkách. U vzorků je proměřován činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci. Zjištěné údaje jsou vyhodnoceny, a je posuzován jednak vliv velikosti ok mříže na hodnotu činitele zvukové pohltivosti, a dále je zkoumán vliv tloušťky mezikruží s nanosenou nanovláknennou vrstvou o různých plošných hmotnostech na hodnoty činitele zvukové pohltivosti.

## ANNOTATION

This diploma thesis deals with the sound absorption characteristics of nanofibres layer. The theoretical part is concerned with sound such as physical effect, especially with the factor of sound absorption and methods which this is possible to measure by. Further, it considers mechanics of the sound absorption by various materials. In the next section of this diploma, otherwise in the experimental part is consideration related to sound absorption ability of nanofibres layers produced from solution of polyvinyl alcohol in different planispheric weights. Nanolayers are spread across the grating made from glass fibres in measure variety of loops and also partly spread across annulus paper variety of thicknesses. By each sample is measured factor of acoustical absorption depending on frequency. Obtained data are evaluated and compares loop size on value of sound absorption factor and further more is compared dependence the annulus paper with laid layer in variety of planispheric weights, impacting on the values of sound absorption factors.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** nanovláknenná membrána, činitel zvukové pohltivosti, mezikruží, mřížka

**KEYWORDS:** nanofiber's membrane, factor of sound absorption, annulus, grating

## Seznam symbolů a zkratk

<b>a</b>	[m]	délka membrány, délka desky
<b>a<sub>0,i</sub></b>	[-]	koeficient pro výpočet rezonančních frekvencí
<b>b</b>	[m]	šířka membrány, šířka desky
<b>b<sub>1</sub></b>	[-]	součinitel tlumení
<b>b<sub>2</sub></b>	[-]	součinitel tlumení
<b>c</b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost šíření zvuku prostředím
<b>c<sub>a</sub></b>	[m.N <sup>-1</sup> ]	akustická poddajnost
<b>c<sub>M</sub></b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost příčné vlny šířící se na membráně
<b>d</b>	[m]	tloušťka vzduchové vrstvy
<b>E</b>	[Pa]	modul pružnosti v tahu
<b>E<sub>pohlčená</sub></b>	[J]	energie pohlcená
<b>E<sub>dopadající</sub></b>	[J]	energie dopadající
<b>E<sub>odražená</sub></b>	[J]	energie odražená
<b>E<sub>prošlá</sub></b>	[J]	energie prošlá
<b>f</b>	[Hz]	frekvence zvuku
<b>f<sub>r</sub></b>	[Hz]	rezonanční (vlastní) frekvence
<b>F<sub>r</sub></b>	[N]	celková napínací síla
<b>F<sub>x</sub></b>	[N]	napínací síla ve směru osy x
<b>F<sub>y</sub></b>	[N]	napínací síla ve směru osy y
<b>h</b>	[m]	tloušťka desky
<b>I</b>	[W.m <sup>-2</sup> ]	intenzita zvuku
<b>I<sub>0</sub></b>	[W.m <sup>-2</sup> ]	prahová hodnota intenzity zvuku
<b>k<sub>M</sub></b>	[m <sup>-1</sup> ]	vlnové číslo
<b>L</b>	[dB]	hladina intenzity zvuku
<b>M</b>	[kg.m <sup>-2</sup> ]	plošná hmotnost desky
<b>m</b>	[kg]	hmotnost
<b>m<sub>1</sub></b>	[kg.m <sup>-2</sup> ]	plošná hmotnost homogenní elastické membrány
<b>m<sub>a</sub></b>	[kg]	akustická hmotnost
<b>m<sub>PL</sub></b>	[kg.m <sup>-2</sup> ]	plošná hmotnost
<b>Pa</b>	[W]	akustický výkon
<b>PVAL</b>	[-]	polyvinylalkohol

<b>PVC</b>	[-]	polyvinylchlorid
<b>p<sub>a</sub></b>	[Pa]	akustický tlak
<b>p<sub>i</sub></b>	[Pa]	dopadající složka akustického tlaku
<b>p<sub>s</sub></b>	[Pa]	statistický tlak
<b>p<sub>r</sub></b>	[Pa]	odražená složka akustického tlaku
<b>q</b>	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	objemová rychlost
<b>r</b>	[m]	poloměr membrány, poloměr hrdla rezonátoru
<b>R<sub>1</sub></b>	[m]	poloměr rezonátoru
<b>R</b>	[-]	činitel zvukové odrazivosti
<b>R<sub>a</sub></b>	[Pa.s.m <sup>-3</sup> ]	akustický odpor
<b>S</b>	[m <sup>2</sup> ]	plocha
<b>T</b>	[s]	perioda
<b>u</b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	akustická rychlost
<b>V</b>	[m <sup>3</sup> ]	objem dutiny
<b>y</b>	[m]	akustická výchylka
<b>z</b>	[Pa.s.m <sup>-1</sup> ]	akustický vlnový odpor
<b>Z<sub>a</sub></b>	[Pa.s.m <sup>-3</sup> ]	akustická impedance
<b>a</b>	[-]	činitel zvukové pohltivosti
<b>β</b>	[-]	činitel zvukové odrazivosti
<b>λ</b>	[m]	vlnová délka
<b>v</b>	[N.m <sup>-1</sup> ]	radiální napínací síla
<b>ρ</b>	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota vzduchu
<b>σ</b>	[-]	Poissonova elastická konstanta
<b>τ</b>	[-]	součinitel průzvučnosti
<b>w</b>	[rad.s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost kmitů
<b>w<sub>0</sub></b>	[rad.s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost (vlastních) kmitů mechanického oscilátoru



# Obsah

<b>ÚVOD .....</b>	<b>- 10 -</b>
<b><u>1. TEORETICKÁ ČÁST .....</u></b>	<b><u>- 11 -</u></b>
1.1 TEORIE ZVUKU .....	- 11 -
1.1.1 ZVUK JAKO MECHANICKÉ VLNĚNÍ.....	- 12 -
1.1.2 ZÁKLADNÍ POJMY AKUSTIKY .....	- 13 -
1.1.3 REZONANCE MECHANICKÉHO OSCILÁTORU .....	- 17 -
1.1.4 ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	- 19 -
1.2 MECHANIKA POHLCOVÁNÍ .....	- 21 -
1.2.1 PORÉZNÍ MATERIÁLY .....	- 23 -
1.2.2 OBKLADY ZALOŽENÉ NA REZONANČNÍM PRINCIPU .....	- 24 -
1.2.3 VÍCENÁSOBNÉ REZONANČNÍ SOUSTAVY .....	- 31 -
1.3 METODA MĚŘENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	- 32 -
1.3.1 DOZVUKOVÁ MÍSTNOST.....	- 32 -
1.3.2 IMPEDANČNÍ TRUBICE.....	- 33 -
1.3.3 METODA ODRAŽENÉ VLNY.....	- 33 -
1.4 NANOVLÁKNA .....	- 35 -
1.4.1 NANOVLÁKENNÁ STRUKTURA .....	- 36 -
1.4.2 CHARAKTERISTIKY ZVUKOVĚ POHLTIVÉHO MATERIÁLU .....	- 36 -
1.5 PROCES ELEKTROSTATICKEHO ZVLÁKŇOVÁNÍ .....	- 37 -
1.5.1 PODSTATA PROCESU ELEKTROSTATICKEHO ZVLÁKŇOVÁNÍ.....	- 37 -
1.5.2 PARAMETRY PROCESU ELEKTROSTATICKEHO ZVLÁKŇOVÁNÍ.....	- 38 -
1.5.3 METODA ZVANÁ NANOSPIDER.....	- 39 -
1.5.4 POLYVINYLALKOHOL .....	- 40 -
<b><u>2. REŠERŠE.....</u></b>	<b><u>- 42 -</u></b>
2.1 TEORIE MEMBRÁN .....	- 42 -
2.2 MODEL C. ZWICKERA A C.W. KOSTENA .....	- 42 -
2.3 MODEL Y. SHOSHANIHO A Y. YAKUBOVA .....	- 43 -
2.4 STUDIE A EXPERIMENTY O POHLCOVÁNÍ ZVUKU.....	- 43 -
<b><u>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</u></b>	<b><u>- 53 -</u></b>

<b>3.1</b>	<b>CÍL PRÁCE.....</b>	<b>- 53 -</b>
<b>3.2</b>	<b>ÚKOLY .....</b>	<b>- 53 -</b>
3.2.1	PŘEDBĚŽNÝ EXPERIMENT .....	- 53 -
<b>3.3</b>	<b>PŘÍPRAVA VZORKŮ .....</b>	<b>- 56 -</b>
3.3.1	PŘÍPRAVA MŘÍŽKY.....	- 56 -
3.3.2	PŘÍPRAVA PAPIROVÝCH VRSTEV .....	- 56 -
3.3.3	TVORBA MEMBRÁNY .....	- 57 -
<b>3.4</b>	<b>VÝROBA VZORKŮ .....</b>	<b>- 58 -</b>
3.4.1	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	- 60 -
<b>3.5</b>	<b>POSTUP MĚŘENÍ.....</b>	<b>- 60 -</b>
3.5.1	MĚŘENÍ NA DVOU MIKROFONOVÉ IMPEDANČNÍ TRUBICI .....	- 60 -
3.5.2	MĚŘENÍ PLOŠNÉ HMOTNOSTI NANOVLÁKENNÉ VRSTVY .....	- 61 -
3.5.3	MĚŘENÍ SAMOTNÉ MŘÍŽE A SAMOTNÉHO PAPIROVÉHO MEZIKRUŽÍ.....	- 62 -
3.5.4	MĚŘENÍ TLOUŠTKY NANOVRSTVY .....	- 62 -
<b>3.6</b>	<b>PARAMETRY VZORKŮ .....</b>	<b>- 64 -</b>
<b>3.7</b>	<b>VYHODNOCOVÁNÍ GRAFŮ.....</b>	<b>- 66 -</b>
<b>3.8</b>	<b>STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ.....</b>	<b>- 67 -</b>
<b>4.</b>	<b><u>DISKUSE.....</u></b>	<b>- 70 -</b>
4.1	VLIV VELIKOSTI OK MŘÍŽKY .....	- 72 -
4.2	VLIV PLOŠNÉ HMOTNOSTI NANOVRSTVY ZVLÁKNĚNÉ NA MŘÍŽKU.....	- 76 -
4.3	VLIV TLOUŠTKY PAPIROVÉHO MEZIKRUŽÍ.....	- 81 -
4.4	VLIV PLOŠNÉ HMOTNOSTI NANOVRSTVY ZVLÁKNĚNÉ NA MEZIKRUŽÍ .....	- 85 -
4.5	POROVNÁNÍ VZORKŮ NANOVLÁKENNÉ VRSTVY STEJNÉ PLOŠNÉ HMOTNOSTI ZVLÁKNĚNÉ NA MŘÍŽKY A PAPIROVÁ MEZIKRUŽÍ.....	- 89 -
<b>5.</b>	<b><u>ZÁVĚR.....</u></b>	<b>- 92 -</b>
<b>6.</b>	<b><u>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</u></b>	<b>- 94 -</b>
<b>7.</b>	<b><u>SEZNAM PŘÍLOH.....</u></b>	<b>- 100 -</b>

## Úvod

V dnešní době, kdy nás moderní technika obklopuje na každém kroku, a se stále intenzivnějším zaváděním strojů, přístrojů a různých zařízení do všech oblastí lidské činnosti se stále častěji setkáváme nejen s všeobecným užitekem, který nám technika přináší, ale i s jejími negativními stránkami, krom jiných i se všeobecně se zvyšující hladinou šumu a hluku. Pobyt v takovémto prostředí není právě příjemný, a dlouhodobě je i zdraví škodlivý.

Odstranit tyto negativní vlivy civilizace není z pochopitelných důvodů možné, ale pomocí různých opatření je možno tyto vlivy alespoň omezit. Vývoj materiálů, které by splňovaly tyto požadavky, se přirozeně rozvíjí současně s potřebou snižování hluku. V minulosti se používaly materiály na bázi skleněných vláken či minerálních vln, v poslední době se stále častěji objevují snahy využít materiály na bázi nanovláknenných vrstev. Běžné porózní materiály pohlcují zvuk především v oblasti vyšších frekvencí. V případě potřeby tlumení zvuku o nižších frekvencích jsou tyto obklady neúčinné a používají se akustické prvky založené na principu rezonance. Po objevení průmyslového způsobu výroby vrstev z nanovláken se hledají stále nové možnosti jejich využití. Nanovláknenná vrstva plní funkci membrány, rezonující na nízké frekvenci.

Tato práce se v teoretické části zabývá problematikou zvuku jako fyzikálního jevu, zejména činitelem zvukové pohltivosti, a metodami, kterými ho lze měřit. Dále se zabývá mechanikou pohlcování zvuku různými materiály, je zde popsána technologie elektrostatické výroby nanovláknenných vrstev, část textu se věnuje i vlastnostem skleněných vláken.

Experimentální část zkoumá zvukově pohltivé vlastnosti nanovláknenných vrstev vyrobených z roztoku polyvinylalkoholu o různých plošných hmotnostech. Nanovrstvy jsou nanесeny jednak na mřížky ze skleněných vláken o různé velikosti ok, a jednak na papírová mezikruží o různých tloušťkách. Zkoumané vzorky jsou umístěny do impedanční trubice, ve vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny. U vzorků je proměřován činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci.

Zjištěné údaje jsou vyhodnoceny, a je posuzován jednak vliv velikosti ok mříže s nanosenou nanovláknennou vrstvou o různých plošných hmotnostech na hodnotu činitele zvukové pohltivosti, a dále je zkoumán vliv tloušťky mezikruží s nanosenou nanovláknennou vrstvou o různých plošných hmotnostech na hodnoty činitele zvukové pohltivosti.

# 1. Teoretická část

## 1.1 Teorie zvuku

Zvukem nazýváme každé mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat v lidském uchu sluchový vjem.

Fyzikálními ději, které jsou spojeny se vznikem zvukového vlnění, jeho šířením a vnímáním zvuku sluchem, se zabývá *akustika*. Zvuk člověku zprostředkovává informace o okolním světě. Celý tento děj přenosu informací si můžeme představit jako přenosovou soustavu, která má tři základní části:

1. zdroj zvuku,
2. prostředí, kterým se zvuk šíří,
3. přijímač zvuku, kterým je v nejjednodušším případě lidské ucho.

Zdrojem zvuku je chvění pružných těles. To se přenáší do okolního prostředí a vzbuzuje v něm zvukové vlnění [1]. Vlivem dlouhodobého vývoje lidstva se ukázalo, že pro dorozumívání a signalizaci je u člověka nejvhodnější frekvence v okolí 1 kHz až 5 kHz, což spolu s biologickými podmínkami vedlo k tomu, že se u něj postupně vytvořil sluchový přijímací systém naladěný právě na tuto oblast frekvencí.

Vzhledem k tomu, že při rezonanci ušního bubínku je amplituda jeho kmitů největší, je též ucho v okolí rezonance nejcitlivější. Čím více se od rezonance vzdalujeme, tím více klesá amplituda kmitání bubínku a tím i sluchový vjem, až u frekvence asi 20 Hz a 20 kHz plně mizí. Vlnění s frekvencí nižší než 20 Hz je neslyšitelné a nazývá se *infrazvukové*, s vyšší frekvencí než 20 kHz je též neslyšitelné a nazývá se *ultrazvukové* [2].

Periodické zvuky nazýváme *hudebními zvuky* nebo *tóny*. Jestliže má zvuk harmonický průběh, je to *jednoduchý tón*. Neperiodické zvuky vnímáme jako hluk (praskot, bušení, skřípání apod.) [1].

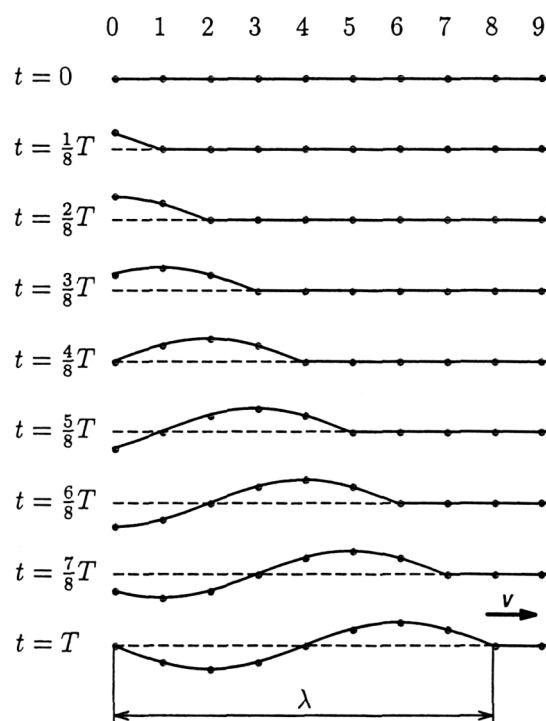
Pro účely dorozumívání a pro hudební a fyziologickou akustiku je podstatný zvuk šířící se vzduchem, zatímco pro technickou (např. stavební) akustiku je navíc důležitý i zvuk procházející pevnou konstrukcí. Ve vzduchu může existovat pouze vlnění podélné tj. tlakové, v pevné látce podélné i příčné tj. smykové [2].

**Akustika** je rozsáhlý vědní obor, zabývající se komplexně zvukem od jeho vzniku, přenosu prostorem až po vnímání lidskými smysly. Má celou řadu poddisciplín,

např. *hudební akustika* zkoumá fyzikální základy hudby, hudebních nástrojů a prostorů, *stavební akustika* zvukové jevy a souvislosti v uzavřeném prostoru, budovách a stavbách, *fyziologická akustika* vznik zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímání v uchu, *psychoakustika* vnímání zvuku v mozku, *elektroakustika* záznam, reprodukci a šíření zvuku s využitím elektrického proudu, *fyzikální akustika* způsob vzniku a šíření zvuku, jeho odraz a pohlcování v různých materiálech [3].

### 1.1.1 Zvuk jako mechanické vlnění

Mechanické vlnění je děj, při němž se kmitání šíří látkovým prostředím. Šíření vln není spojeno s přenosem látky. Vlněním se však přenáší energie. Mechanické vlnění vzniká v látkách všech skupenství, a jeho příčinou je existence vazebných sil mezi částicemi (atomy, molekulami) prostředí, kterým se vlnění šíří. Kmitání jedné částice se vzájemnou vazbou přenáší na další částici. Současně se tak na tuto částici přenáší energie kmitavého pohybu. Takové prostředí označujeme jako **pružné prostředí**. Přenos kmitání mezi částicemi pružného prostředí se vytváří vlna. Jestliže hmotný bod, který je zdrojem vlnění, kmitá harmonicky, vzniká mechanická vlna sinusového průběhu. Na obr. 2 a 3 je pružné prostředí znázorněno řadou mechanických oscilátorů (spřažených kyvadel). Jestliže první kyvadlo vychýlíme ve směru osy  $y$  a necháme ho volně kmitat, začnou postupně kmitat i ostatní kyvadla. Kmitání konstantní rychlostí  $c$  postupuje ve směru osy  $x$ . Vzniká **postupné vlnění příčné** a rychlost  $c$  je rychlost postupného vlnění. Vznik postupné vlny je dobře patrný z obr. 1. Vlnová délka je definovaná vztahem

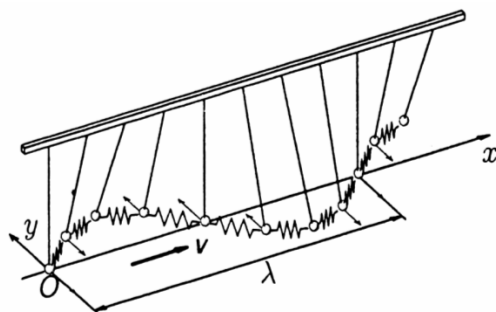


Obrázek 1: Postupné vlnění v řadě bodů převzaté z [1].

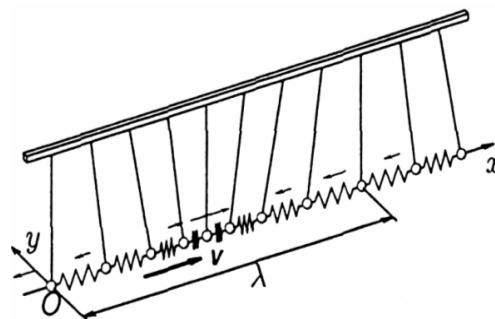
$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T, \quad (1)$$

kde  $\lambda$  [m] je vlnová délka (délka vlny),  $c$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] rychlost postupného vlnění,  $T$  [s] perioda opakování děje a  $f$  [Hz] frekvence kmitání, neboli kmitočet zvuku, vyjadřující

počet změn za jednotku času ( $1\text{Hz} = 1/\text{s}$ ). Vlnová délka je vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází.



Obrázek 2: Vznik postupného vlnění příčné.  
Čerpáno z [1].



Obrázek 3: Postupné vlnění podélné.  
Čerpáno z [1].

Rozlišujeme dva základní typy postupného mechanického vlnění:

1. **Postupné vlnění příčné**, kdy hmotné body pružného prostředí kmitají kolmo na směr, kterým vlnění postupuje. Je charakteristické pro pružná pevná tělesa ve tvaru tyčí, vláken apod. Pozorujeme ho také na vodní hladině (viz obr. 2).
2. **Postupné vlnění podélné**, při němž částice pružného prostředí kmitají ve směru, kterým vlnění postupuje (viz obr. 3). Vzniká v tělesech všech skupenství, tedy i v kapalinách a plynech, která jsou pružná při změně objemu (tzn. při stačování a rozpínání). Postupným vlněním podélným se v pružných látkách šíří zvuk.

Jestliže se pružným prostředím šíří vlnění ze dvou nebo více zdrojů, jednotlivá vlnění postupují prostředím nezávisle. Avšak v místech, kde se vlnění setkávají, dochází k jejich skládání - nastává *interference vlnění*, a kmitání bodu v uvažovaném místě je určeno superpozicí okamžitých výchylek jednotlivých vlnění.

Pokud vlnění dospěje k rozměrné překážce, popř. na rozhraní mezi dvěma prostředími, v nichž se vlnění šíří různou rychlostí, pak se od překážky vlnění odráží, nebo rozhraním dvou prostředí prochází. Na překážce nastává *odraz a lom vlnění*. Pro odraz mechanického vlnění platí zákon odrazu. Úhel odrazu vlnění se rovná úhlu dopadu. Odražený paprsek leží v rovině dopadu. Předešlé odstavce jsou čerpány z [1].

### 1.1.2 Základní pojmy akustiky

**Rychlost zvuku  $c$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]** – vyjadřuje za jak dlouho překoná zvuková vlna v daném materiálu vzdálenost 1 m ve směru šíření. Rychlost zvuku ve vzduchu závisí

na složení vzduchu (nečistoty, vlhkost), ale nejvíce na teplotě. Ve vzduchu o teplotě  $t$  v Celsiových stupních má zvuk rychlost

$$c = (331,82 \pm 0,61\{t\})[m/s].$$

Pro výpočty se běžně používá přibližná hodnota pro běžné teploty vzduchu 340 m/s. Rychlost zvuku je stejná pro zvuková vlnění všech frekvencí. V kapalinách a pevných látkách je rychlost zvuku větší než ve vzduchu.

Přibližné hodnoty rychlosti zvuku pro některé látky jsou v tabulce 1.

**Tabulka 1: Rychlost zvuku. Převzato z [4]. <sup>(a)</sup> 0 °C a tlak 1 atm pokud není uvedeno jinak.**

**<sup>(b)</sup> Při 20 °C a salinitě 3,5 %.**

<b>Prostředí</b> <i>Plyny</i> (a)	<b>Rychlost zvuku</b> [m/s]	<b>Prostředí</b> <i>Pevné látky</i> (a)	<b>Rychlost zvuku</b> [m/s]	<b>Prostředí</b> <i>Kapaliny</i> (a)	<b>Rychlost zvuku</b> [m/s]
Vzduch (0 °C)	331	Hliník	6420	Voda (0 °C)	1402
Vzduch (20 °C)	343	Ocel	5941	Voda (20 °C)	1482
Helium	965	Žula	6000	Mořská voda <sup>(b)</sup>	1522
Vodík	1284				

**Frekvence  $f$  [Hz]** – každý libovolný periodický pohyb (libovolné kmitání) má svou frekvenci  $f$ , určující počet kmitů za jednu sekundu.

**Perioda  $T$  [s]** – je čas potřebný k provedení jednoho úplného kmitu (jednoho úplného cyklu pohybu). Perioda souvisí s frekvencí vztahem

$$T = \frac{1}{f}. \quad (2)$$

**Huygensův princip** – vlnoplocha postupného vlnění je plocha, jejíž body kmitají se stejnou fází. Každý bod vlnoplochy, do něhož dospělo vlnění v určitém okamžiku, můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách. Vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch ve směru, v němž se vlnění šíří.

Předešlé odstavce jsou čerpány z [1].

**Akustický tlak  $p_a$  [Pa]** – je to rozdíl mezi okamžitým celkovým tlakem prostředí a jeho statickým tlakem při šíření zvukového vlnění tímto prostředím. Přitom *statický tlak  $p_s$*  je tlak, který by byl v témž místě prostředí, kdyby se jím nešířilo zvukové vlnění. Akustický tlak je tedy změna tlaku prostředí (zpravidla velmi malá) vyvolaná

zvukovým vlněním, které se jím šíří. Je-li prostředí otevřené a je tvořeno vzduchem, je jeho statickým tlakem tlak atmosférický.

**Akustická rychlost  $u$  [m.s<sup>-1</sup>]** – je proměnná rychlost uspořádaného kmitavého pohybu částic prostředí, které konají, šíří-li se prostředím zvukové vlnění.

**Akustický výkon  $P$  [W]** – je výkon vyzařovaný, přenášený nebo přijímaný prostřednictvím zvukového vlnění. Projde-li danou plochou za dobu  $\Delta t$  zvuková energie  $\Delta E$ , pak okamžitý akustický výkon procházející touto plochou je dán vztahem

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{dE}{dt}. \quad (3)$$

**Akustická výchylka  $y$  [m]** – je okamžitá výchylka uspořádaného kmitavého pohybu částic prostředí, který konají, jestliže se prostředím šíří zvukové vlnění.

**Akustická impedance  $Z_a$  [Pa.s/m<sup>3</sup>]** – je *komplexní veličina* definovaná pro zvukové vlny, které jsou zároveň harmonickými vlnami. Akustická impedance (4) na dané ploše je rovna podílu komplexního vyjádření akustického tlaku  $p_a$  na této ploše a komplexního vyjádření  $q$  objemové rychlosti určené pro tuto plochu

$$Z_a = \frac{p}{q}. \quad (4)$$

Reálná část  $R_a$  akustické impedance se nazývá *akustický odpor*, její imaginární část  $X_a$  se nazývá *akustická reaktance*. Akustická impedance  $Z_a$  se používá hlavně pro vyšetřování zvukového pole v uzavřeném prostoru.

**Akustická admittance** – je převrácená hodnota akustické impedance, vyjadřuje snadnost, se kterou zvukové vlny pronikají prostředím.

Předešlé odstavce jsou čerpány z [5].

**Intenzita zvuku  $I$  [W·m<sup>-2</sup>]** – je veličina zavedená pro objektivní hodnocení zvuku. Je definována vztahem

$$I = \frac{P}{S}, \quad (5)$$

kde  $P$  je výkon zvukového vlnění, a  $S$  je obsah plochy, kterou vlnění prochází.

Jestliže intenzita zvuku má hodnotu  $I$ , pak v logaritmické stupnici můžeme vyjádřit

tzv. **hladinu intenzity zvuku  $L$  [dB]**. Určíme ji pomocí vztahu

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad (6)$$

kde  $I_0$  je intenzita odpovídající prahu slyšení zvuku o frekvenci 1 kHz

( $I_0 = 10^{-12}$  W·m<sup>-2</sup>). Odpovídá hladině intenzity zvuku 0 dB.



Příklady hladin intenzity zvuku pro některé známé zvuky jsou v tabulce 2.

Tabulka 2: Hladina intenzity zvuku pro některé známé zvuky. Čerpáno z [1].

Zdroj zvuku	Vzdálenost [m]	Hladina intenzity zvuku [dB]
Práh slyšitelnosti	-	0
Tíkot hodinek	0,1	20
Tichý rozhovor	1	40
Normální rozhovor	1	60
Křik	1	80
Symfonický orchestr	3 až 5	80
Hluk motorových vozidel	10	90
Startující letadlo	10	110
Práh bolestivosti	-	120

**Hlasitost zvuku** – je veličina subjektivní, vyjadřuje, jak silně působí zvuk na normální sluch. Závisí nejen na intenzitě zvuku, ale i na citlivosti sluchu na zvuky různé frekvence. Největší citlivost ucha je přibližně při frekvencích 700 Hz až 6 kHz. Nejmenší intenzita zvuku, kterou jsme při dané frekvenci schopni vnímat, určuje tzv. **práh slyšení**. Intenzita zvuku dané frekvence, při níž vzniká v uchu bolestivý pocit, určuje **práh bolesti**.

Zvuk je charakterizován třemi základními veličinami, jsou to: *výška zvuku*, *barva zvuku* a *hlasitost*. **Výška zvuku** je určena jeho frekvencí. **Barva tónu** je určena nejen počtem vyšších harmonických tónů obsažených ve složeném tónu, ale také jejich amplitudami. Umožňuje sluchem rozlišit dva složené tóny stejné absolutní výšky, které vydávají např. dva různé nástroje.

Předešlé odstavce jsou čerpány z [1].

**Bílý šum** – je to náhodný signál, používaný pro testování přenosových vlastností neznámých systémů. Ideální bílý šum se vyznačuje mimo jiné tím, že v jeho spektru jsou zastoupeny všechny frekvence [6].

**Rezonance** – označuje jev, který lze pozorovat při nuceném kmitání, kdy vhodně působící malá budící síla může způsobit velké změny v kmitajícím systému. Rezonance lze pozorovat v případě nucených kmitů, je-li frekvence vnější budící síly shodná s vlastními kmity oscilátoru [7].

**Ozvěna** – je zvláštním případem odrazu zvuku od rozlehlé překážky, jako je např. skalní stěna nebo velká budova. Je v podstatě důsledkem vlastnosti sluchu, kterým

rozlišíme dva po sobě následující zvuky, pokud mezi nimi uplyne doba alespoň 0,1 s. To je přibližně doba, kterou potřebujeme k vyslovení jedné slabiky, a zvuk urazí celkovou vzdálenost 34 m, tzn. 17 m od pozorovatele k překážce a 17 m zpět. Při vzdálenosti 17 m od překážky tedy vzniká tzv. jednoslabičná ozvěna. Při větší vzdálenosti mohou vznikat ozvěny víceslabičné. Jestliže je překážka blíže než 17 m, zvuky již neodlišíme, částečně se překrývají a odražený zvuk splývá se zvukem původním. To se projevuje jako prodloužení trvání zvuku, které nazýváme **dozvuk**.

S dozvukem je třeba počítat při projektování velkých místností, koncertních sálů apod. Působí rušivě a snižuje srozumitelnost řeči nebo zkresluje hudbu. Proto se akustické vlastnosti sálů zlepšují rozčleňováním ploch stěn, závěsy a použitím materiálů, které pohlcují zvuk.

Předešlé odstavce jsou čerpány z [1].

**Doba dozvuku** – je doba  $T$  potřebná k tomu, aby v uzavřeném prostoru po ukončení působení zdroje zvuku klesla průměrná hustota akustické energie na  $10^{-6}$  původní hodnoty, neboli aby klesla o 60 dB. Doba dozvuku, při které se posluchači zdá poslech hudby nebo slova nejpříznivější, se nazývá optimální doba dozvuku.

**Zvuková energie** – je rozdíl mezi celkovou energií látkového prostředí, jímž se šíří zvuková vlna, a jeho energií při absenci této vlny. Zvuková energie je součtem celkové kinetické energie kmitavých pohybů částic prostředí, které konají při šíření zvukové vlny, a deformační energie příslušející deformacím elementů prostředí, k nimž přitom dochází.

Předešlé odstavce jsou čerpány z [5].

### 1.1.3 Rezonance mechanického oscilátoru

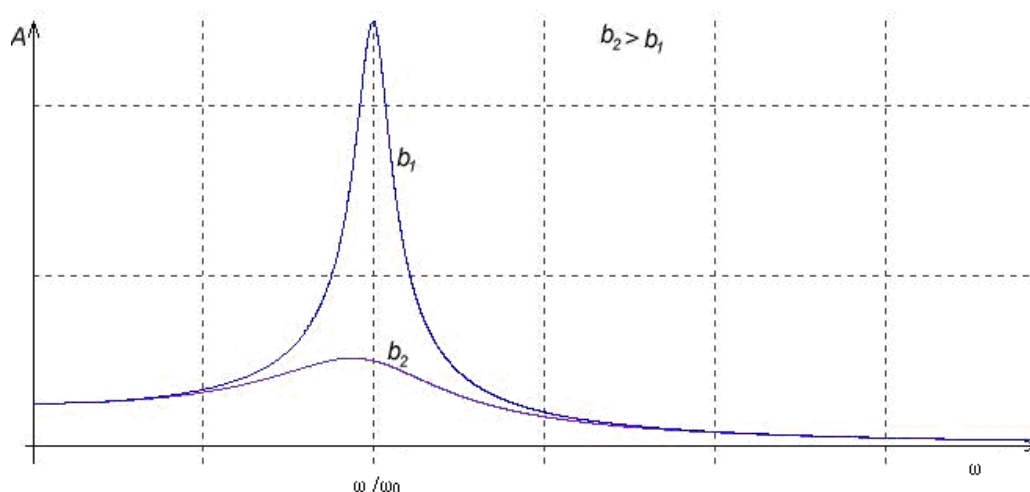
Pokud na mechanický oscilátor působí vnější harmonická síla, oscilátor nuceně kmitá. Jestliže se bude frekvence  $\omega$  nuceného kmitání postupně zvětšovat od určité minimální hodnoty, bude se amplituda výchylky též zvětšovat, a maxima dosáhne u málo tlumeného oscilátoru v okamžiku, kdy  $\omega = \omega_0$ . Jakmile se frekvence nuceného kmitání vyrovná frekvenci vlastního kmitání oscilátoru, nastane rezonance oscilátoru. Při dalším zvyšování frekvence se amplituda nucených kmitů opět zmenšuje. U oscilátoru se součinitelem tlumení  $b$  nastává rezonance při nižší úhlové frekvenci  $\omega_r$ , pro kterou platí vztah

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2b^2} \quad (7)$$

$\omega = \omega_0$  - rezonance

$\omega / \omega_0 = 1$  - maximální amplituda

Grafem, který vyjadřuje popsanou závislost amplitudy výchylky nuceného kmitání jako funkci úhlové frekvence ( $y_m = f(\omega)$ ), je **rezonanční křivka**. Na obr. 4 jsou rezonanční křivky pro dvě hodnoty součinitele tlumení.



**Obrázek 4: Rezonanční křivky mechanického oscilátoru s různým tlumením  $b_1$  a  $b_2$ , přičemž  $b_1 < b_2$ . Čerpáno z [7].**

Čím menší je tlumení oscilátoru, tím je maximum rezonanční křivky vyšší ( $y_m$  dosahuje vyšších hodnot a křivka je užší). Naopak při menším tlumení sice amplituda výchylky dosahuje menších hodnot, ale rezonanční křivka je širší (oscilátor lze rozkmitat v širším intervalu frekvencí).

Z průběhu rezonanční křivky je zmíněný poznatek důležitý zejména pro praktické využití rezonance. Při rezonanční frekvenci dosahuje amplituda nucených kmitů větší hodnoty, než by odpovídalo výchylce způsobené vnější silou při velmi nízké frekvenci (počáteční bod rezonanční křivky). Nastává *rezonanční zesílení* nucených kmitů. Malou, periodicky působící silou, lze v oscilátoru vzbudit kmitání o značné amplitudě výchylky, pokud je perioda vnějšího působení shodná periodou vlastního kmitání oscilátoru.

Rezonanci můžeme považovat za vzájemné působení dvou oscilátorů. Jeden je zdrojem nuceného kmitání (oscilátor) a druhý se působením zdroje nuceně rozkmitá (rezonátor). Obklady založené na rezonančním principu jsou pak blíže popsány v kapitole 2.2.2. Předěšlé odstavce jsou čerpány z [1].

#### 1.1.4 Činitel zvukové pohltivosti

Nemá-li zvuk v cestě stěny nebo jiné překážky, šíří se z rozměrově malého zdroje radiálně v kulovitém tvaru, podobném neustále se rozpínajícímu balónu. V uzavřeném prostoru též zvukový zdroj vytváří zvukovou vlnu, která se šíří v kulovitých vlnoplochách, dokud se nesetká s povrchem překážky. Po tomto setkání se může další postup čela vlny podstatně změnit, což závisí na vlastnostech, orientaci a utváření povrchu. Volbou ohraničujících ploch, aby buď pohlcovaly, odrážely, nebo propouštěly dopadající vlnu, lze uskutečnit některý předem stanovený cíl akustického projektu. Například v posluchárně je třeba na některých plochách zvuk pohlcovat, aby se potlačily nežádoucí ozvěny. Zároveň je třeba zvuk od některých ploch odrážet proto, aby se v místě posluchače signál zesílil. Každý z těchto cílů vyžaduje použití materiálů, které mají od základu jiné akustické vlastnosti, totiž odrazivost a pohltivost. Protože jak pohlcování, tak odraz zvuku jsou stejně důležité, můžeme tvrdit, že všechny stavební materiály pro plochy, omezující daný prostor, mohou a měly by být považovány za „akustické“ materiály.

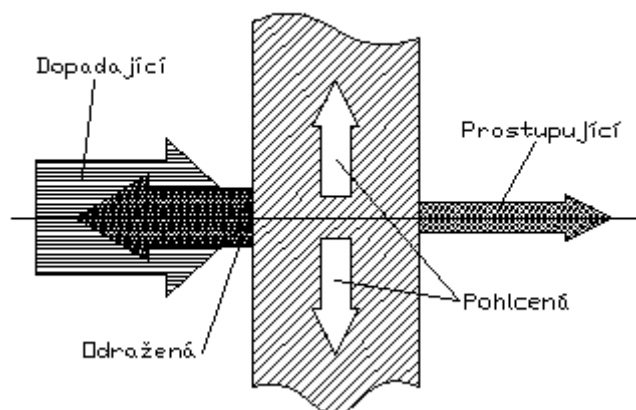
Běžně se výrazu „akustické materiály“ používá pro ony materiály, které jsou schopné pohlcovat značně vysoké procento zvuku dopadajícího na jejich povrch. I když není přesně stanovena dolní hranice u procenta pohlcovaného zvuku, které musí materiál vyhovět, aby byl kvalifikován jako „akustický“, všeobecně se předpokládá, že činí asi 20 %. Proti tomu obyčejné stavební materiály, jako je sklo, sádra, beton atd., mají zvukovou pohltivost, která všeobecně nepřesahuje 5 až 10 %, častěji je v rozsahu jen 1 až 5 %.

Při šíření zvuku v akusticky neupraveném prostoru, kde ohraničující plochy mají tvrdý povrch, jsou po delší dobu slyšitelné odrazy, které v některých případech mohou trvat dokonce 10 až 15 sekund. Základním účelem akustického materiálu je snížit buď střední hladinu akustického tlaku nebo dobu dozvuku v místnosti. Akustické materiály se obvykle připevňují na stěny a stropy, a příležitostně se zavěšují volně v prostoru místnosti. V místnostech určených k poslechu řeči a hudby je určité prodloužení zvuku žádoucí. Uplatňování akustických materiálů v těchto případech se označuje jako „regulování dozvuku“. V prostorách, kde může hluk vadit, je všeobecně jakékoli prodlužování zvuku nežádoucí. Uplatnění akustických materiálů v těchto případech se označuje jako „regulování hluku“.

Jedním z nejdůležitějších aspektů při potlačování hluku v praxi je problém činitelů zvukové pohltivosti materiálů a předmětů. Dopadne-li zvuková vlna na plochu,

její energie se zčásti odrazí a zčásti pohltí. Schopnost plochy pohlcovat zvukovou energii se vyjadřuje pomocí činitele pohltivosti označovaného symbolem  $\alpha$ . Činitel je definován vztahem (8) jako poměr energie pohlcené plochou k energii na plochu dopadající. Činitel zvukové pohltivosti je bezrozměrné číslo, jehož velikost se může pohybovat v intervalu od 0 do 1. U stěny pohlcující zvuk úplně se činitel zvukové pohltivosti rovná 1, zatímco u stěny dokonale zvuk odrážející se tento činitel rovná nule. Lze očekávat, že pohltivost daného materiálu bude záviset na tom, jak bude uplatněn např. na způsobu montáže. Kromě toho činitelé pohltivosti jsou u všech materiálů závislí na kmitočtu. Materiály obsahující rezonanční dutiny se vyznačují kmitočtovou oblastí s velkou pohltivostí, obklopenou po obou stranách oblastmi s malou pohltivostí. Máme-li tedy vyjádřit pohltivost materiálu nebo předmětu, musíme znát křivku závislosti  $\alpha$  na kmitočtu.

Předešlé odstavce jsou čerpány z [8 a 9].



**Obrázek 5: Zvuková energie dopadající na materiál je částečně odražena, částečně absorbována a zčásti projde. Čerpáno z [3].**

Pokud dopadá na povrch stěny nebo jiné překážky zvuková vlna, potom se část zvukové energie odrazí zpět, část pohltí stěna, a část projde do prostoru za stěnou (obr. 5). Činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  [-] je definován poměrem pohlcené akustické energie k celkové dopadající energii

$$\alpha = \frac{E_{\text{pohlcená}}}{E_{\text{dopadající}}} \quad (8)$$

Činitel zvukové odrazivosti  $\beta$  [-] je definován vztahem (9) čili poměrem odražené akustické energie k celkové dopadající energii

$$b = \frac{E_{\text{odražená}}}{E_{\text{dopadající}}} . \quad (9)$$

Poměr akustické energie, která prošla konstrukcí k celkové dopadající energii, definuje součinitel průzvučnosti  $\tau$  [-]

$$t = \frac{E_{\text{prostupující}}}{E_{\text{dopadající}}} . \quad (10)$$

Vzhledem k zákonu zachování energie musí platit:  $\alpha + \beta + \tau = 1$ .

Předešlé odstavce jsou čerpány z [9 a 5].

## 1.2 Mechanika pohlcování

Pro dobrou akustiku uzavřených místností jako jsou např. kina, divadla, přednáškové sály, učebny, konferenční sály je nutná taková úprava, aby doba dozvuku byla optimální, to znamená, že je požadována krátká doba dozvuku, zejména pak při použití reprodukční techniky k ozvučení prostor. Chtěné a plánované odrazy zvuku mohou být způsobem, jak zvýšit čistotu řeči i daleko od řečníka. Je možno zlepšit srozumitelnost projevu, omezit nežádoucí zvuky nebo zvýšit míru soukromí v rámci daného prostoru nebo mezi přilehlými místnostmi. Aby bylo tohoto dosaženo, provádějí se úpravy pohlivosti stěn.

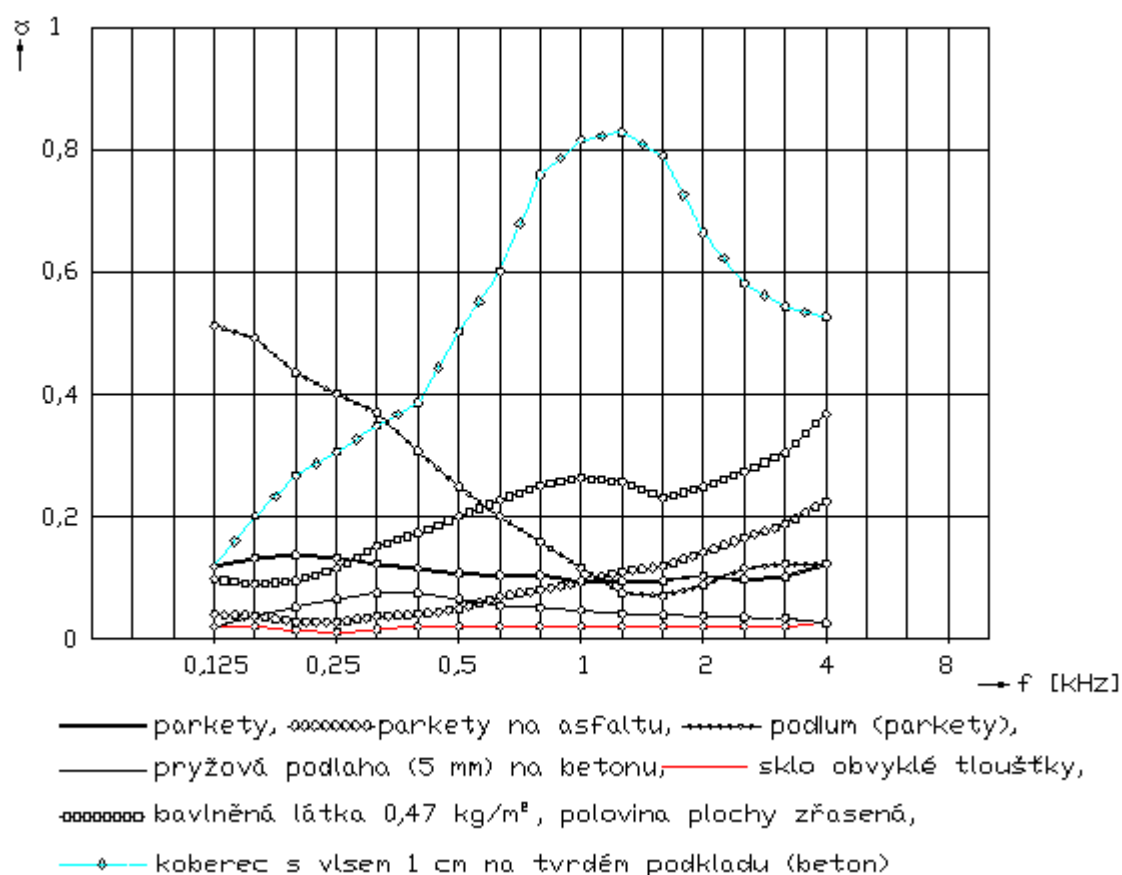
Termín pohlivost zvuku označuje pokles zvukové energie v místnosti, a udává úroveň omezování hluku uvnitř místnosti. Akustické podhledové kazety absorbují zvukovou energii a slouží k řízení doby dozvuku. Různá struktura povrchů kazet poskytuje různé úrovně pohlcování zvuku. Akustické obklady pro pohlcování zvuku nelze zaměňovat s materiály pro zlepšení zvukové izolace stavebních a jiných konstrukcí, neboť pohltivé akustické obklady mají velmi nízký stupeň zvukové neprůzvučnosti. Zvuková neprůzvučnost se vztahuje ke schopnosti tlumení hluku pronikajícího do místnosti zvenčí, například hluk z dopravy, nebo z okolních místností.

Z hlediska pohlcování zvuku můžeme obklady rozdělit do tří skupin:

- Ø obklady tvořené porézními materiály,
- Ø obklady založené na principu rezonance,
- Ø složené pohltivé konstrukce.

Kromě uvedených druhů obkladů, určených k pohlcování zvuku, pohlcují zvuk i různé užitkové a okrasné předměty, u nichž není pohltivost primární vlastností, avšak pro návrh prostoru je zapotřebí znát jejich pohltivost. Jejich velikosti jsou uvedeny na obr. 6.

Předchozí odstavce jsou čerpány z [9, 10 a 11]



Obrázek 6: kmitočtový průběh činitele zvukové pohltivosti různých materiálů. Čerpáno z [9].

Pod pojmem pohlcování zvuku rozumíme nevratnou přeměnu zvukové energie v energii jinou. Z tohoto hlediska můžeme způsob přeměny zvukové energie při šíření v pevných látkách rozdělit na tři druhy:

- Ø přeměny vznikající třením,
- Ø přeměny vznikající poklesem akustického tlaku tj. změnami relaxačními,
- Ø přeměny vznikající nepružnou deformací těles.

K přeměně zvukové energie v tepelnou *tření* dochází tehdy, pohybují-li se vzduchové částice podél určité plochy. Má-li se takto přeměnit větší množství zvukové

energie, musí plocha na níž nastává tření, být dostatečně velká. Proto se k pohlcování zvuku tímto způsobem dobře hodí látky porézní, u nichž se zvuk šíří v látce jemnými póry, jejichž celková plocha je značně veliká. K viskózním ztrátám zvukové energie dochází všeobecně na stěnách otvorů pórů, na povrchu kanálků nebo vláken.

Přeměna zvukové energie, kterou jsme označili jako *relaxační*, vzniká následkem zmenšení akustického tlaku. V místech, ve kterých nastává zhuštění částic, stoupá zároveň celkový tlak, tj. akustický tlak nabývá kladných hodnot. Jestliže dojde ke zmenšení nebo relaxaci akustického tlaku, zmenší se nashromážděná potenciální energie, a tím se zmenší i energie zvukové vlny.

K přeměně zvukové energie vlivem *nepružné deformace těles* dochází u látek, které vykazují tzv. pružnou hysterezi. Stlačíme-li takovou látku určitou silou, nevrátí se tato látka do původního stavu ani když síla přestane působit. Práce vynaložená na deformaci je tedy větší než práce získaná pružností tělesa zpět při návratu do původního tvaru, a jejich rozdíl představuje úbytek zvukové energie vlivem nedokonalé pružnosti. Předchozí odstavce jsou čerpány z [9].

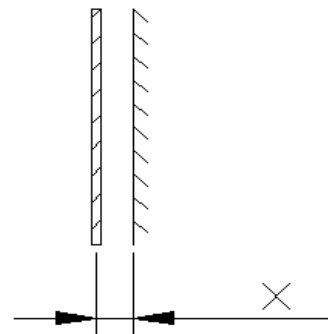
### 1.2.1 Porézní materiály

Pod pojmem porézní materiál máme v akustice obvykle na mysli pevnou látku, v jejímž objemu jsou malé dutinky vyplněné vzduchem. Poměr objemu těchto dutinek k celkovému objemu látky bývá dosti značný, činí asi 80 až 90 % celkového objemu. Kostra z porézního materiálu má buď vláknitou strukturu nebo strukturu z tuhé pěny. Má-li materiál dobře pohlcovat zvuk, musí být její póry navzájem propojeny, aby se zvuk mohl materiálem šířit dále. Póry nemusí být propojeny u materiálů, jejichž kostra je velmi poddajná, elastická.

Vlastní pohlcování zvuku, tedy přeměna akustické energie v energii tepelnou, se děje v mezní vzduchové vrstvě u povrchu vláken nebo konstrukce vlivem viskózních sil. Čím je materiál tlustší, tím má vyšší činitel zvukové pohltivosti v oblasti nízkých kmitočtů. Tato skutečnost souvisí s velikostí pohybové energie přeměňované v teplo a závisí na amplitudě akustické rychlosti. Tato rychlost je u zadní stěny, kde vzniká při odrazu zvuku její uzel, rovna nule. S rostoucí vzdáleností od stěny akustická rychlost stoupá, a maximální hodnoty dosáhne v kmitně, vzdálené o čtvrtinu vlnové délky od pevné stěny [9].



Obdobného účinku dosáhneme, vytvoříme-li za porézní vrstvou uzavřený vzduchový polštář (obr. 7). Popsaný účinek vzduchového polštáře se projevuje tehdy, je-li porézní vrstva upevněna v určité vzdálenosti od stěny tak, aby sama nemohla kmitat, nebo jde-li o materiál v ohybu tak poddajný, že ohybové kmity prakticky nepřicházejí v úvahu [9].



**Obrázek 7: Měkká porézní deska ve vzdálenosti „x“ od pevné stěny. Čerpáno z [9].**

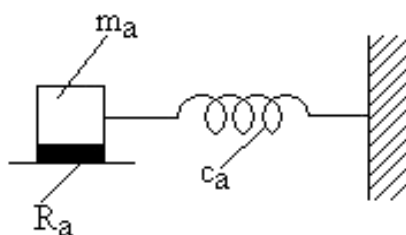
### 1.2.2 Obklady založené na rezonančním principu

Tyto obklady můžeme rozdělit do 3 skupin:

- Ø uspořádání chovající se jako kmitající membrány,
- Ø uspořádání chovající se jako kmitající desky,
- Ø uspořádání spočívající na principu Helmholtzových rezonátorů.

Pro uvedené případy je možné použít náhradní zjednodušený mechanický model tzv. rezonanční soustavy (obr. 8) skládající se z akustické hmotnosti  $m_a$ , připojené na akustickou poddajnost  $c_a$ , jejichž pohyb je tlumen akustickým odporem  $R_a$ .

Dopadne-li na ni zvukové vlnění, uvede ji do vynucených kmitů, jejichž amplituda je maximální v případě rezonance. Přestane-li dopadat vlnění na soustavu, bude soustava ještě po jistou dobu dokmitávat vlastním, rezonančním kmitočtem. Doba, po kterou takový rezonátor doznívá, je závislá na tlumení rezonátoru.



**Obrázek 8: Mechanická analogie akustické rezonanční soustavy o akustické hmotnosti  $m_a$ , akustické poddajnosti  $c_a$  a akustickém odporu  $R_a$ .**

Čerpáno z [9].

Každý rezonátor přeměňuje jistou část zvukové energie v energii jinou, působením rezonátoru dochází vždy k útlumu. Má-li tedy rezonanční soustava sloužit k účinnému pohlcování zvuku, musí být dostatečně tlumena, a to tak, aby co největší

množství zvukové energie, nashromážděné v rezonátoru, bylo přeměněno na energii tepelnou.

Závislost činitele zvukové pohltivosti na kmitočtu vykazuje u rezonančních soustav vždy maximum na vlastním kmitočtu soustavy, neboť množství zvukové energie, přeměněné v jinou energii, stoupá s velikostí amplitudy některé z akustických veličin (např. akustická rychlost), a ty mají v rezonanci své maximum.

Předchozí odstavce jsou čerpány z [9].

#### 1.2.2.1 Kmitající membrány

Pod pojmem kmitající membrány rozumíme tenkou desku nebo fólii, jejíž tuhost v ohybu je velmi nepatrná, a která je umístěna v určité vzdálenosti od pevné stěny. Chování takové membrány můžeme přirovnat k chování tělesa určité hmotnosti  $m$  (reprezentovaného membránou), pružně zachyceného na pružině (reprezentované vzduchovým polštářem). Prostor mezi membránou a zadní pevnou stěnou bývá vyplněn porézním materiálem, který *tlumí* kmitání částic vzduchu v tomto prostoru, a tím i celou soustavu. Obvykle se volí membrána z takové látky, aby její ohybová tuhost ve srovnání s tuhostí vzduchového polštáře byla mnohem menší [9].

Tenká *kruhová membrána*, je útvar, který vznikne např. napnutím tenké **homogenní** elastické fólie s **konstantní plošnou hustotou**  $m_l$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) na tuhý kruhový rám. Tímto napnutím, vyvolaným radiálně působící silou, membrána získává svoji tuhost. Radiálně působící napínací síla, vztažená na jednotku délky obvodu rámu, je ve všech směrech konstantní, a je rovna vztahu

$$n = \frac{F_r}{2p \cdot r}, \quad (11)$$

kde  $F_r$  je celková napínací síla a  $r$  udává poloměr membrány (nebo-li poloměr tuhé kruhové podpory, přes niž je membrána napjata). Poloměr membrány  $r$  je nepřímo úměrný napětí membrány, tedy se zvyšujícím se poloměrem membrány se bude napětí snižovat. Napínací sílu na jednotku délky nazýváme též napětí. Je třeba však mít vždy na zřeteli, že v tomto případě jde o sílu na jednotku délky. O tomto napětí (působící v rovině membrány) předpokládáme, že je ve všech místech stejné. Kromě membrány kruhové se v aplikacích používají i jiné tvary membrán, např. membrána eliptická, obdélníková atd.

Vychýlíme-li membránu z klidové polohy (např. akustickým tlakem), membrána, která původně tvořila rovinnou plochu, se deformuje. Přestane-li působit síla, která

výchytku vyvolala, vrací se všechny body membrány zpět, a jejich potenciální energie, kterou vychýlením získaly, přecházejí v kinetickou energii pohybujících se hmotných plošných elementů a membrána se rozkmitá. Neuvažujeme-li tlumení, bude membrána kmitat volnými netlumenými kmity.

Rychlost příčné vlny  $c_M$  [ $\text{m.s}^{-1}$ ], šířící se na membráně, je dána vztahem

$$c_M = \sqrt{\frac{\nu}{m_l}}, \quad (12)$$

kde  $\nu$  [ $\text{N.m}^{-1}$ ] je radiální napínací síla,  $m_l$  [ $\text{kg.m}^{-2}$ ] označuje plošnou hmotnost homogenní elastické membrány.

Pokud je splněn předpoklad osově symetrických kmitů, pak platí vztah (13), ze kterého lze pomocí koeficientů  $a_{0,i}$  z tab. 3 stanovit vlastní frekvenci membrány

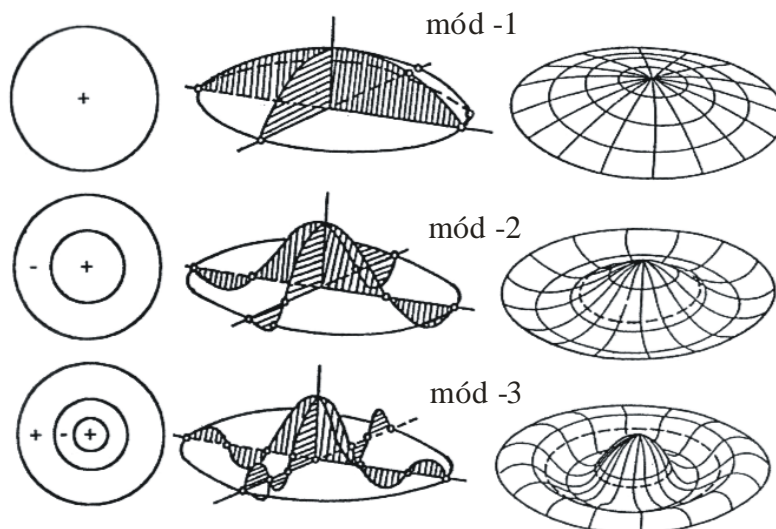
$$w_i = \frac{a_{0,i} c_M}{r}, \quad (13)$$

kde  $c_M$  [ $\text{m.s}^{-1}$ ] je rychlost příčné vlny šířící se na membráně,  $r$  [m] udává poloměr membrány.

**Tabulka 3: Hodnoty  $a_{0,i}$  symetrických volných kmitů tenké kruhové membrány. Čerpáno z [12].**

<b>(n = 0), i</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b><math>a_{0,i}</math></b>	2,4048	5,5201	8,6537	11,7915

Na obr. 9 je znázorněno rozložení výchylek prvních tří symetrických módů kmitání kruhové membrány. Jsou zde v řezech naznačeny průhybové čáry při jednotlivých módech, nakresleny uzlové čáry, označeny polarity výchylek, a znázorněny tvary ploch.



Obrázek 9: Výchyšky prvních tří symetrických módů kruhové membrány. Čerpáno z [12].

*Odvození vztahů pro výpočet rezonančních frekvencí:*

Pro výpočet vlastních frekvencí membrány dle vzorce (13) je zapotřebí nejprve stanovit rychlost příčné vlny  $c_M$ , šířící se na membráně. To nelze bez znalosti radiálně působící napínací síly  $\nu$ , která vyvolává napnutí membrány na kruhovém rámu. Veličiny  $c_M$  a  $\nu$  nejsou známy, proto vzorec (13) nelze pro výpočet aplikovat. Jeho úpravou však lze potřebné vztahy získat.

Pro stanovení úhlové rychlosti platí vztah

$$w_i = 2pf_i, \quad (14)$$

kde  $f_i$  je frekvence kmitů.

Dosazením do vztahu (13), je možno rovnici přepsat jako

$$2pf_i = \frac{a_i c_M}{r}. \quad (15)$$

Po úpravě tohoto vztahu je možno vyjádřit

$$f_i = \left( \frac{a_i c_M}{2p \cdot r} \right) \Rightarrow \frac{f_i}{a_i} = \frac{c_M}{2p \cdot r}. \quad (16)$$

Poměr  $\frac{c_M}{2p \cdot r}$  je konstantní, neboť poloměr membrány, ani rychlost šíření vlny membránou se nemění. Platí tedy

$$\frac{f_1}{a_1} = \frac{f_2}{a_2} = \frac{f_3}{a_3} = \frac{f_4}{a_4}. \quad (17)$$

Po úpravě jsou získány vztahy pro výpočet druhých ( $f_2$ ), třetích ( $f_3$ ) a čtvrtých ( $f_4$ ) rezonančních frekvencí. Hodnotu první rezonanční frekvence  $f_1$  lze odečíst z grafu. Hodnoty koeficientů  $a_1$ - $a_4$  pak z tab. 3.

$$\frac{f_1}{a_1} = \frac{f_2}{a_2} \Rightarrow f_2 = \frac{a_2}{a_1} f_1 = \frac{5,5201}{2,4048} f_1, \quad (18)$$

$$\frac{f_1}{a_1} = \frac{f_3}{a_3} \Rightarrow f_3 = \frac{a_3}{a_1} f_1 = \frac{8,6537}{2,4048} f_1, \quad (19)$$

$$\frac{f_1}{a_1} = \frac{f_4}{a_4} \Rightarrow f_4 = \frac{a_4}{a_1} f_1 = \frac{11,7915}{2,4048} f_1. \quad (20)$$

První rezonanční frekvence lze odečíst z naměřených hodnot z grafu, ostatní hodnoty rezonančních frekvencí pak lze vypočítat podle vztahů (18), (19) a (20).

Z výše uvedených vztahů (14), (15) a (16) je zřejmé, že poloměr membrány  $r$  je nepřímo úměrný frekvenci  $f$ , a se zvyšujícím se poloměrem membrány se frekvence kmitů bude snižovat. Ze vztahu (1) je pak zřejmé, že se snižující se frekvencí kmitů kmitající membrány se vlnová délka  $\lambda$  bude naopak prodlužovat. Stejně tak tomu bude i u tenké *pravoúhlé membrány*, která je napínána ve směru os  $x$  a  $y$  napětím na jednotku délky. Membrána s délkami stran  $a$ ,  $b$  a osami  $x$ ,  $y$  je napínána ve směru os silami:

$$F_x = b \cdot n, \quad F_y = a \cdot n.$$

Pro vlastní kmitočty *obdélníkové membrány* platí vztah

$$w_{m,n} = p \cdot c_M \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}, \quad (21)$$

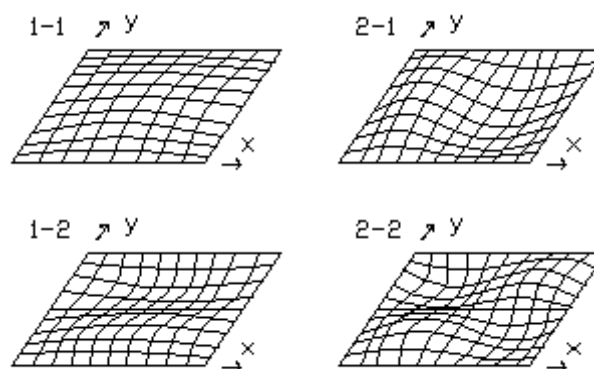
kde  $c_M = \sqrt{\frac{v}{m_1}}$  je rychlost vlny v membráně,  $a$  a  $b$  jsou délky stran membrány (obr.10).

Při zvětšování stran kmitající membrány se frekvence kmitů bude snižovat a vlnová délka  $\lambda$  prodlužovat. Obdélníková membrána s různou velikostí ok byla předmětem zkoumání této práce.

Pro *čtvercovou membránu* dostáváme vztah

$$w_{m,n} = \frac{p \cdot c_M}{a} \sqrt{m^2 + n^2}, \quad (22)$$

kde  $a$  je délka strany membrány.



Obrázek 10: Výchyly vidů 1-1, 1-2, 2-1, 2-2 obdélníkové membrány.  
Čerpány z [12].

Předchozí odstavce jsou čerpány z [12].

#### 1.2.2.2 Kmitající desky

V některých případech se hmotnost membrány zvyšuje tím, že se místo ní použije tuhá deska, velmi měkce na okraji upevněná, takže kmitá jako píšť. Kmitající desky se od membrány liší především svou tuhostí v ohybu, která je obvykle značně větší než tuhost vzduchového polštáře.

*Vlastní frekvence* obdélníkové desky o rozměrech  $a$  a  $b$ , tloušťce  $h$ , plošné hmotnosti  $M$  a modulu pružnosti  $E$ , která je upevněná na okraji (nikoli vetknuta), jsou dány výrazem

$$f_{p,q} = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{rc^2}{Md} + \frac{4p^2}{M} \left[ \left( \frac{p}{a} \right)^2 + \left( \frac{q}{b} \right)^2 \right]^2 \frac{Eh^3}{12(1-s^2)}}, \quad (23)$$

kde  $d$  je vzdálenost desky od pevné stěny,

$M$  je plošná hmotnost desky,  $M = m/S$ ,

$\sigma$  – Poissonova elastická konstanta,

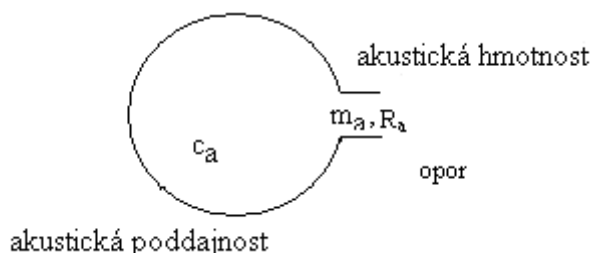
$p$  a  $q$  – módová čísla příslušného vlastního kmitu - 1, 2,...

Potřebného *tlumení* kmitajících desek se dosáhne obvykle vyplněním dutiny mezi deskou a stěnou vhodnými porézními materiály. Maximum v kmitočtovém průběhu činitele zvukové pohltivosti je obvykle v oblasti nízkých kmitočtů.

Předchozí odstavce jsou čerpány z [9].

### 1.2.2.3 Helmholtzovy rezonátory a děrované desky

Další typ rezonančních soustav, požívaných k pohlcování zvuku, jsou rezonátory Helmholtzova typu. Helmholtzovy rezonátory jsou uspořádané buď jednotlivě, nebo sdružené do tzv. děrovaných desek. Helmholtzův rezonátor je tvořen dutinou o určitém objemu  $V$ , opatřenou hrdlem, v níž je určitá hmotnost, kterou si můžeme představit jako píst (obr. 11). Vlastností objemu je poddajnost  $c_a$ , píst představuje akustickou hmotnost  $m_a$ . Pohybu pístu, a tedy i akustické hmotnosti je kladen určitý odpor, který má velikost  $R_a$ . Dopadají-li na otevřený rezonátor zvukové vlny, rozkmitá se vzduch hustoty  $\rho$  v rezonátoru o poloměru  $R_l$ .

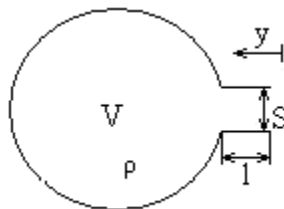


Obrázek 11: Helmholtzův rezonátor [9].

Hrdlo vytváří zátku o poloměru  $r$ . Tlakové vlny jsou rychlé, takže stlačování vzduchu uvnitř rezonátoru můžeme považovat za adiabatické. Posune-li se vzduch v hrdle o hmotnosti  $m = r \cdot S \cdot l$  o délku  $y$  z rovnovážné polohy, změní se tlak vzduchu v nádobě o hodnotu  $\Delta p$  (obr. 12). Vlnová délka rezonující vlny v Helmholtzově rezonátoru je výrazně větší než rozměry rezonátoru. Pro rezonanční frekvenci takového rezonátoru platí výraz (24), který je obecnějším vyjádřením pro libovolnou dutinu objemu  $V$ , je-li otvor dutiny realizován trubičkou délky  $l$ , je nutno při stanovení rezonanční frekvence uvažovat i tuto délku.

$$f_r = \frac{c}{2p} \sqrt{\frac{2r}{V}} \quad (24)$$

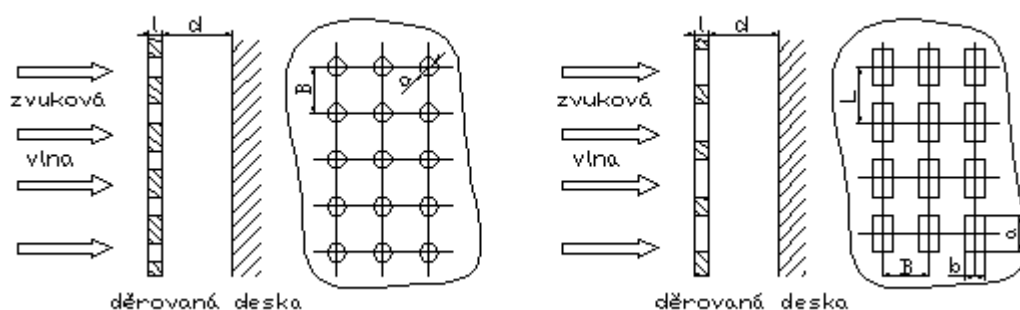
Rezanančním pohlcováním zvuku dutinami v porézních materiálech se tak vysvětluje zvukově izolační působení těchto materiálů.



Obrázek 12: Schéma znázornění Helmholtzova rezonátoru [9].

Jednotlivě rozmístěné rezonátory se používají v praxi velmi zřídka s výjimkou případů, kdy z nějakého důvodu nelze použít kmitající membrány nebo desky. Často se

požívají tzv. děrované panely, které jsou tvořeny tuhou deskou, umístěnou v určité vzdálenosti od stěny a opatřenou kruhovými nebo obdélníkovými otvory. Deska je umístěna v určité vzdálenosti od pevné stěny, takže ke každému otvoru přísluší určitá dutina, která tvoří s otvorem Helmholtzův rezonátor. Přitom vzduch v dutině se vyznačuje akustickou poddajností a vzduch v otvoru reprezentuje akustickou hmotnost. Na útlumu panelu závisí jak dosažená absorpce tak, i šířka pásma, ve které panel pohlcuje. Tlumení rezonátoru lze nejlépe charakterizovat velikostí měrného akustického odporu  $Ra$ . Maximální pohltivosti můžeme dosáhnout pro  $Ra = z$ , kde  $z$  je vlnový odpor vzduchu. Významný je také poměr  $l/d$ .

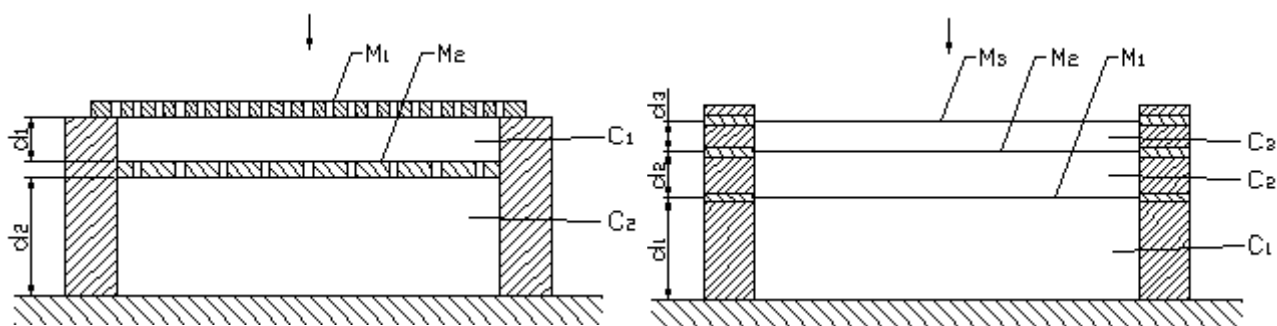


Obrázek 13: Děrovaný panel s kruhovými nebo obdélníkovými otvory. Čerpáno z [9].

Předchozí odstavce jsou čerpány z [9].

### 1.2.3 Vícenásobné rezonanční soustavy

Perforované panely mají kmitočtový rozsah pohltivosti poměrně omezený. Proto se často sdružují do panelů složených, tvořených několika rezonančními obvody. V těchto případech se osvědčují dvouprvkové nebo tříprvkové rezonanční soustavy, jež vzniknou položením dvou nebo tří rezonančních konstrukcí na sebe [9].



Obrázek 14: Dvouprvková a tříprvková rezonanční soustava. Čerpáno z [9].



### 1.3 Metoda měření činitele zvukové pohltivosti

Prostorová akustika je obor akustiky zabývající se šířením zvuku prostorem. Jde především o zjišťování podmínek kvalitního poslechu slova a hudby v místnostech, a podmínek vzájemné zvukové izolace jednotlivých částí budov. Kvalita poslechu závisí na rozměrech a tvaru místnosti jako celku, tvaru jejích částí, a na vlastnostech stěn místnosti. Z hlediska akustiky místnosti je nejdůležitější vlastností stěny její pohltivost, která se vystihuje činitelem zvukové pohltivosti.

Pro stanovení činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  existuje několik metod, například:

- Ø dozvuková místnost,
- Ø impedanční trubice,
- Ø metoda odražené vlny.

#### 1.3.1 Dozvuková místnost

Při metodě dozvukové komory se v místnosti s velkým dozvukem umístí velký obdélníkový vzorek akustického materiálu, a připevní se jedním ze způsobů upevňování vzorků, používaném při laboratorních zkouškách akustických materiálů. Měření se provede při kmitočtech 125, 250, 500, 1000 a 4000 Hz. Pozoruje se vliv vzorku na dobu dozvuku místnosti při každém kmitočtu, a porovnává se s dozvukem v místnosti bez vzorku při každém kmitočtu. Z těchto porovnávacích zkoušek se vypočítají součinitele zvukové pohltivosti pro vzorek, a uvádějí se jako hodnoty charakterizující materiál při daném upevnění a kmitočtu.

Výhodou této metody je všesměrový dopad zvuku (náhodný dopad), což se nejspíše blíží podmínkám, s nimiž se shledáváme u stavebních prostorů. Náhodného dopadu zvukových vln se dosahuje rozvěšením velkého počtu prvků rozptylující zvuk. Dozvukové místnosti bez prvků rozptylující zvuk buď s nerovnoběžnými stěnami nebo se třemi stěnami opatřenými válcovými plochami nezaručujícími dostatečně všesměrový dopad zvuku na měřený vzorek. Nevýhodou této metody je potřeba velké místnosti, jejíž objem musí být větší než 180m<sup>3</sup>. Další nevýhodou je potřeba vzorků velkých rozměrů.

Předchozí odstavce jsou čerpány z [8 a 9].

### 1.3.2 Impedanční trubice

V experimentální části této práce byla pro měření činitele zvukové pohltivosti vláknenných materiálů použita dvou mikrofónová impedanční trubice.

Mezi její nevýhody patří měření dopadu zvuku pouze v kolmém směru, který se v praxi vyskytuje jen výjimečně. Naopak výhodou oproti metodě, využívající k měření činitele zvukové pohltivosti dozvukovou místnost, je potřeba vzorků malých rozměrů, potom ovšem poměrně malý vzorek materiálu reprezentuje celou vláknennou vrstvu [9].

### 1.3.3 Metoda odražené vlny

Výhodou této metody je všesměrový dopad zvuku, který odpovídá skutečným podmínkám a potřeba vzorků malých rozměrů. Činitel zvukové pohltivosti je vypočítán z naměřených hladin akustického tlaku. Nevýhodou je nutnost podložky s nulovou zvukovou pohltivostí, a použití směrového reproduktoru a mikrofónu pro vyloučení snímání přímého zvuku [13].

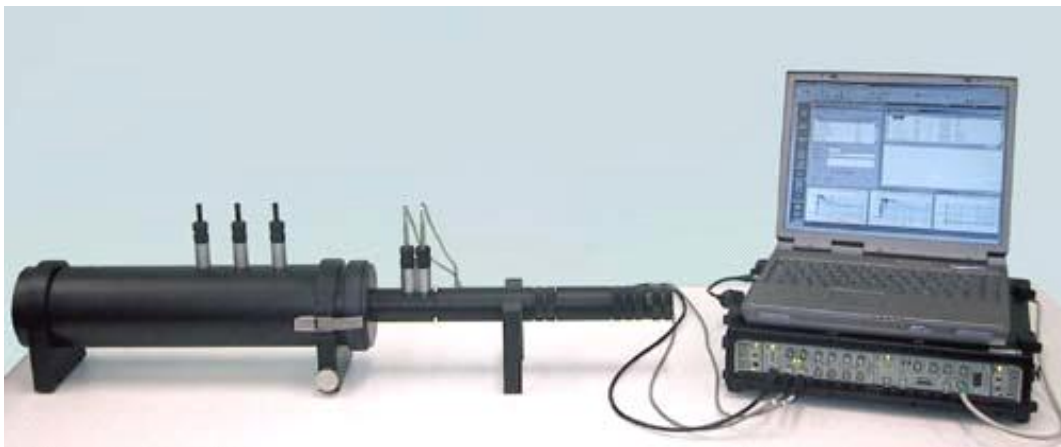
#### 1.3.3.1 Dvou mikrofónová impedanční trubice

Dvou mikrofónová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206 (obr. 15 a 16) se používá pro měření akustických charakteristik, jako jsou např. činitel zvukové pohltivosti, činitel zvukové odrazivosti ve frekvenčním rozsahu od 50 Hz do 6,4 kHz.

Tato metoda měření činitele zvukové pohltivosti spočívá v rozkladu širokopásmového stacionárního náhodného signálu do jeho dopadající a odražené složky. Signál je generován uvnitř odporové trubice zdrojem zvuku, odražená složka je ovlivněna akustickými vlastnostmi testovaného vzorku [14].

Měřicí soustava se skládá z

- Ø dvou mikrofónové impedanční trubice,
- Ø generátoru náhodného zvukového signálu se zesilovačem,
- Ø analyzátoru signálů,
- Ø výpočetní jednotky,
- Ø měřeného vzorku materiálu.



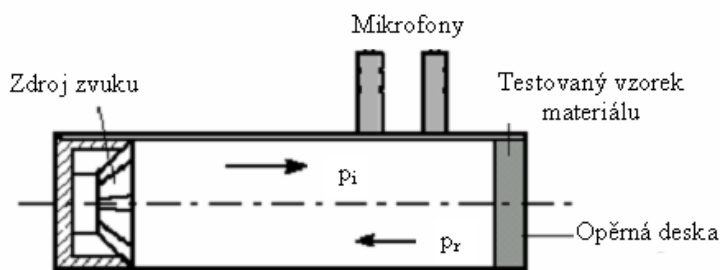
Obrázek 15: Dvou mikrofónová impedanční měřicí trubice typ 4206. Převzato z [15].

#### Princip měření:

Signál, vytvářený zvukovým zdrojem, dopadá na vzorek materiálu, který je umístěn na opačném konci trubice. Jedná se o náhodný signál tzv. ideální bílý šum používaný pro testování přenosových vlastností neznámých systémů. Vyznačuje se mimo jiné tím, že v jeho spektru jsou zastoupeny všechny frekvence. Zvukové vlny se šíří jako rovinné vlny v trubici, naráží na měřený vzorek materiálu, a jsou odrazeny.

Mikrofony na stěně trubice snímají na dvou místech složky dopadajícího  $p_i$  a odraženého  $p_r$  akustického tlaku (viz obr.16), pomocí nichž jsou vypočítány tři frekvenční přenosové funkce: frekvenční přenosová funkce, frekvenční přenosová funkce související s dopadající složkou, a frekvenční přenosová funkce související s odraženou složkou. Z těchto získaných hodnot lze určit celkový činitel zvukové odrazivosti  $R$ . Činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  pak lze vypočítat pomocí vztahu

$$\alpha = 1 - |R|^2. \quad (25)$$



Obrázek 16: Schéma řezu impedanční trubicí, kde  $p_i$  je dopadající složka akustického tlaku, a  $p_r$  odražená složka akustického tlaku. Čerpáno z [14].

Předchozí odstavce jsou čerpány z [14].

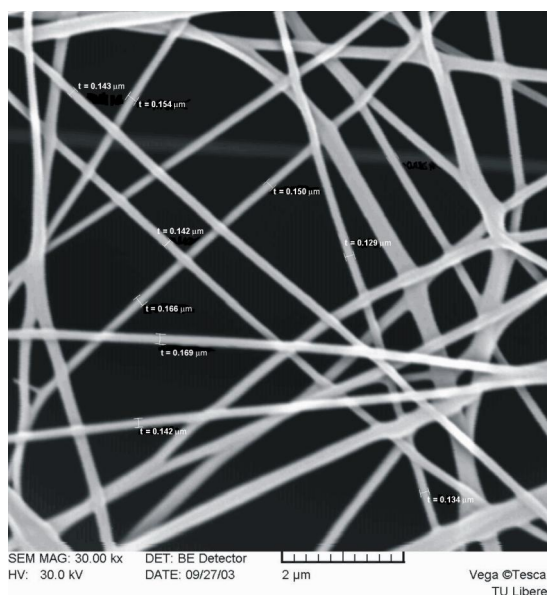
## 1.4 Nanovláknna

Na setkání americké fyzikální společnosti v Pasadeně 29. prosince 1959, předložil americký fyzik Richard Feynman při své přednášce, nazvané: „There's plenty of room at the bottom“, což v překladu znamená: „dole je hodně místa“, pozoruhodnou vizi budoucnosti. Jeho přednáška znamenala počátek toho, co je dnes známo jako „nanotechnologie“ [16].

Nanovláknna jsou vlákna, jejichž průměr se pohybuje v submikronovém rozsahu, tedy do 1000 nm. Elektrostaticky zvlákněná nanovláknna mají řadu významných vlastností, které je činí výbornými kandidáty pro širokou škálu aplikací, jako vysoce účinné filtry, separační membrány, výztuhy pro kompozitní materiály, biologické aplikace, tkáňové inženýrství, ale i jako nanoelektrické zařízení a vodíkové nádrže pro palivové články.

Důležitou vlastností je i jejich akustické chování. Jsou považovány za zvukopohltivé materiály s velkou škálou použití, jako jsou akustické konstrukce a bariéry, koberce či izolační pláště stěn. Nanovláknna (viz obr. 17) se vyznačují vlastnostmi jako je velký měrný povrch vláken, což je poměr povrchu vláken k jejich objemu, velká pórovitost vlákenné vrstvy a malý rozměr pórů.

Předchozí odstavce jsou čerpány z [17 a 18].



**Obrázek 17: Vláknenná vrstva z PVA získaná metodou elektrostatického zvláknování na zařízení Nanospider [18].**

#### 1.4.1 Nanovláknenná struktura

Nanovláknenná struktura umožňuje vývoj nové rezonanční membrány, rezonující na nízkých frekvencích. Nanovláknenný materiál, tlumený vláknennou netkanou textilií, převyšuje dosud známé materiály. Pohlcuje zvuk při nízkých frekvencích, a současně neztrácí schopnost pohltivosti pro vyšší frekvence. Tento charakter je dán nano-rozměry mezivláknenných prostorů. Tyto charakteristiky zajišťují nové zvukově pohltivé chování nanovláknenných vrstev. Dopadne-li na akustickou rezonanční membránu zvukové vlnění, uvede ji do vynucených kmitů, jejichž amplituda je maximální v případě rezonance. Vláknenný materiál zajišťuje dostatečný útlum rezonující membrány tak, aby co největší množství zvukové energie, nashromážděné v rezonátoru, bylo přeměněno v energii tepelnou [10].

#### 1.4.2 Charakteristiky zvukově pohltivého materiálu

##### *Tloušťka*

Platí, že čím má materiál větší tloušťku, tím je činitel zvukové pohltivosti vyšší v oblasti nižších frekvencí. Absorpční maxima se s rostoucí tloušťkou posunují směrem k nižším frekvencím. Obdobného účinku lze dosáhnout, vytvoří-li se mezi porózní vrstvou a pevnou stěnou vzduchová mezera [10].

##### *Zaplnění*

Tlak v porózním materiálu roste s jeho zaplněním až do mezního stavu, kdy je zaplnění tak velké, že zvuk se nešíří póry, ale je odražen. Lze tedy pozorovat růst činitele zvukové pohltivosti se zaplněním [10].

##### *Průměr vlákna*

Činitel zvukové pohltivosti vláknenných materiálů roste s klesajícím průměrem vláken při zachování konstantní objemové hmotnosti vláknenného materiálu, což je způsobeno větším měrným povrchem vláken o menší jemnosti. Tření mezi vzduchem a povrchem póru je realizováno na větší interakční ploše, a je tak spotřebováno více akustické energie [10].

##### *Anizotropie*

Pokud se zvukové vlny šíří kolmo na směr uspořádání vláken ve vláknenném systému, měření činitele zvukové pohltivosti indikuje rezonanční efekt. V opačném případě rezonance nevznikají [10].

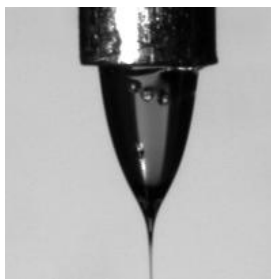
## 1.5 Proces elektrostatického zvlákňování

Formhals v rozmezí let 1934 až 1944 publikoval sérii patentů [19, 20, 21, 22, 23], popisujících experimentální plán pro výrobu polymerních vláken za použití elektrostatické síly. Formhals použil polymerní roztok, konkrétně acetát celulózy, a ten uvedl do elektrického pole. Mezi dvěma elektrodami opačné polaroty pomocí zvlákňovacích trysek tak poprvé zvláknil polymerní roztok v jemné filamenty, které zachytil na uzemněném kolektoru.

Proces elektrostatického zvlákňování je způsob přípravy ultra jemných vláken z polymerního roztoku nebo polymerní taveniny pomocí elektrostatických sil. Častěji jsou zvlákňovány polymery ve formě roztoku, protože vyšší viskozita polymerních tavenin nedovoluje utváření jemných vláken. Ale i použití polymerních roztoků sebou přináší řadu nevýhod. Polymery musí být rozpuštěny v rozpouštědlech, která často bývají toxická a zdraví škodlivá, což při průmyslovém využití znamená ochranu pracovníků před jejich účinky. Možným řešením je použití vodných roztoků, které ale vyžadují následné začlenění procesu síťování pro zamezení rozpustnosti vláken ve vlhkém prostředí [17].

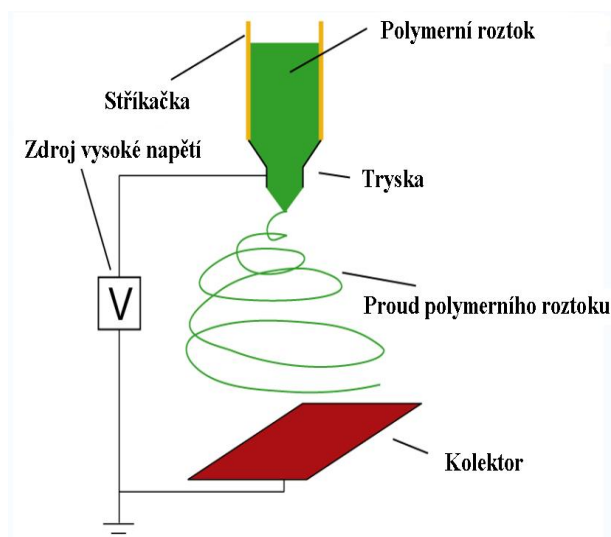
### 1.5.1 Podstata procesu elektrostatického zvlákňování

V procesu elektrostatického zvlákňování je využíváno vysokého napětí k vytvoření elektricky nabitého proudu polymerního roztoku nebo taveniny. Jedna elektroda vysokého napětí je spojena s polymerním roztokem nebo taveninou, druhá je napojena na sběrnou clonu. Při připojení vysokého napětí na elektrody je na povrchu polymeru indukován elektrický náboj. Vzájemná odpudivost nábojů způsobí sílu přímo opačnou povrchovému napětí. S rostoucí intenzitou elektrického pole se hemisférický povrch kapaliny ve špičce kapilární trubičky prodlužuje, až se vytvoří kuželový tvar známý jako tzv. Taylorův kužel (viz obr.18).



Obrázek 18: Taylorův kužel. Čerpáno z [18].

Se stoupající intenzitou elektrického pole odpuzující elektrostatičká síla překoná povrchové napětí polymeru, nabitý proud polymerní taveniny je vypuzen ze špičky Taylorova kužele a podstupuje bičující proces (viz obr. 19), při němž se rozpouštědlo vypařuje nebo tuhne tavenina, a dochází k náhodnému usazení vlákna na uzemněnou sběrnou clonu. Předchozí odstavce jsou čerpány z [24].



Obrázek 19: Princip elektrostatičkého zvlákňování. Čerpáno z [17].

### 1.5.2 Parametry procesu elektrostatičkého zvlákňování

Schopnost polymeru formovat se do vláken je označována jako zvlákňitelnost, a ve skutečnosti je to soubor vlastností tuto schopnost ovlivňujících. Parametry jsou rozdělovány nejčastěji na procesní a systémové.

Mezi *procesní charakteristiky*, mající vliv na tvorbu vláken metodou elektrostatičkého zvlákňování, patří elektrická vodivost a dielektrické vlastnosti polymerního roztoku nebo taveniny, intenzita elektrického pole a elektrický proud procesu, vzdálenost kolektoru od zvlákňování trysky nebo kapiláry, okolní parametry (teplota, vlhkost a rychlost vzduchu v komoře), a pohyb cílové plochy, pokud se pohybuje.

*Systémové parametry* jsou především vlastnosti zvlákňovaného materiálu, a jsou to molekulová hmotnost polymeru, distribuce molekulové hmotnosti polymeru a jeho architektura (rozvětvený, lineární atd.), koncentrace polymerního roztoku (zvlákňování polymerních roztoků), viskozita, hustota, povrchové napětí a viskoelastičita roztoku, dále také teplota zvlákňování (ta je důležitá zejména při zvlákňování polymerních tavenin), rychlost odpařování rozpouštědla a roztoků a rychlost tuhnutí polymerní

taveniny, a přídavek aditiv. Elektrostatické zvlákňování je vhodné pro široký okruh polymerů, stejný jako pro konvenční zvlákňování. Doposud bylo metodou elektrostatického zvlákňování zpracováno dle [17] více jak 50 druhů polymerů. Pro každý materiál je tedy nutné hledat ideální podmínky procesu.

*Hodnocenými vlastnostmi* získaného materiálu jsou zejména průměr vláken a jeho distribuce velikosti, hustota korálkových defektů vláken, morfologie vlákenné vrstvy mezivláknenných pórů a jejich velikostní distribuce, množství mezivláknenných pórů. S póry jsou spojené prodyšnost, filtrační a separační vlastnosti. Předchozí odstavce jsou čerpány z [17].

### 1.5.3 Metoda zvaná Nanospider

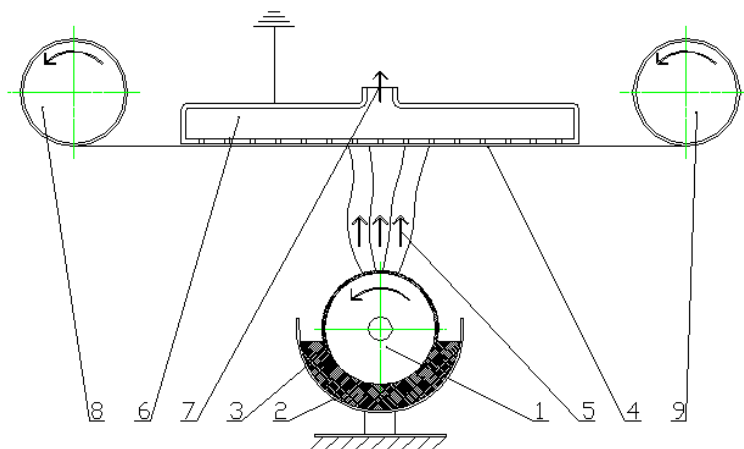
Tento nový způsob elektrostatického zvlákňování byl vyvinut na Katedře netkaných textilií Technické univerzity v Liberci a následně v roce 2003 patentován.

Tento systém (viz obr. 20), nazvaný „Nanospider“, má mnohem vyšší výkonnost, než doposud vyzkoušená zařízení elektrostatického zvlákňování, umožňuje výrobu nanovláknenných textilií v průmyslovém měřítku. Jeho hlavní princip spočívá v poznatku, že Taylorovy kužely je možné vytvořit i na tenké vrstvě polymerního roztoku. Pomocí hladkého válečku, smáčeného v polymerním roztoku, se při zvlákňování vytváří mnoho Taylorových kuželů současně. Jejich počet závisí například na přiváděném elektrickém proudu a napětí, intenzitě elektrického pole, vzdálenosti kolektoru, rychlosti vzduchu v komoře, na koncentraci, vodivosti, povrchovém napětí a viskozitě roztoku.

Vzhledem k časté toxicitě rozpouštědel je metoda určena pro zpracování vodorozpustných systémů, což ale nevylučuje možnost vytvořit nanovláknena i z jiných polymerů, než těch rozpustných ve vodě. Vláknena jsou odsávána přes síto a zachycena na podkladovou textilií (melt blown, spun bond).

Při použití vodných roztoků se vyžaduje následné začlenění procesu síťování pro zamezení rozpustnosti vláken ve vlhkém prostředí [17 a 18].

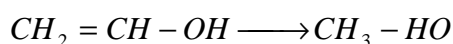




**Obrázek 20: Schéma zařízení Nanospider: 1 – otáčející se kovový váleček (spojený se zdrojem napětí), 2 – zvlákňovaný roztok, 3 – zásobní vanička, 4 – podkladová vrstva, 5 – tvorba nanovláken, 6 – uzemněná sběrná clona, 7 – odsávání vzduchu, 8 – příváděcí váleček, 9 – odváděcí váleček.**

#### 1.5.4 Polyvinylalkohol

Pro potřeby této práce bylo využito polymerního roztoku polyvinylalkoholu (PVAL) k výrobě nanovláknenných vrstev technologií elektrostatického zvlákňování. Polyvinylalkohol je polymer, který se nezískává z monomeru. Vinylalkohol totiž neexistuje. Produktem všech reakcí, které by jej mohly zdánlivě poskytnout, je acetaldehyd, neboť alkohol, jehož hydroxylová skupina by byla vázána na stejný uhlíkový atom, ze kterého vychází dvojná vazba, se přesmykem ještě ve stavu svého zrodu mění na odpovídající aldehyd:



„vinylalkohol“      „acetaldehyd“

Proto se polyvinylalkohol vyrábí hydrolýzou polyvinylacetátu. Z tohoto důvodu obsahuje polyvinylalkohol vždy jisté množství polyvinylacetátových skupin, které tento polymer modifikuje, a jsou příčinou jeho dosti proměnných vlastností. Polyvinylalkohol je bílý prášek, zřetelně krystalického charakteru. Jeho odolnost vůči rozpouštědlům závisí na obsahu nehydrolyzovaného polyvinylacetátu, na střední molekulové hmotnosti a také na teplotě. Polymer s více než pětiprocentním obsahem vinylacetátových

jednotek se již rozpouští ve vodě jen při teplotách nad 65 °C. Čím vyšší je jeho molekulová hmotnost, tím menší je jeho rozpustnost. V olejích není rozpustný ani při vyšších teplotách. V jednosytných alkoholech botná, ve vícesytných (např. v glycerolu) se rozpouští, zvláště za tepla. Z kyselin odolává organickým, ve vodných roztocích anorganických kyselin a jejich solí přechází při teplotách nad 160 °C na viskózní až nerozpustnou hmotu. Je málo termoplastický. Lze jej použít za teplot od -50 °C do 130 °C, nad 200 °C se rozkládá.

Svým chováním polyvinylalkohol v mnohém připomíná želatinu. Používá se např. v chemickém průmyslu, pro výrobu nátěrových hmot, k výrobě lepidel, obalových fólií, chirurgických nití, textilních vláken atd. Pro své mechanické vlastnosti a dobrou zvláknitelnost se polyvinylalkohol používá pro výrobu nanovrstev, sloužící pro akustické obklady stěn. Polyvinylalkohol je rozpustný ve vodě, proto aby byla vzniklá nanovláknenná vrstva stabilní, musí být po zvláknění zesíťována. Polyvinylalkohol bývá nejčastěji zesíťován formaldehydem.

Předchozí odstavce jsou čerpány z [25].

## 2. Rešerše

Obor akustiky má četná odvětví, avšak žádné z nich se nerozvíjí tak rychle jako odvětví potlačování hluku. Počet případů v akustice, kdy by prosté rozumové úvahy mohly vést na scestí, je tak velký, že se často říkalo, že potlačování hluku je umění. Jsou známy teoretické poznatky o zvukově pohltivém chování různých materiálů porézních či neporézních, textilních či netextilních. Po objevení průmyslového způsobu výroby vrstev z nanovláken se hledají stále nové možnosti jejich použití. Vše je díky této poměrně mladé technologii pouze v počátcích. Teoretické poznatky o zvukově pohltivém chování nanovláknenných materiálů nejsou tedy ještě zcela prozkoumány.

### 2.1 Teorie membrán

Tato práce vychází z teorie uvedené v [12]. Tenkou kruhovou membránu si lze představit jako fólii napnutou přes tuhý kruhový rám. Tímto napnutím, vyvolaným radiálně působící silou, membrána získává svoji tuhost. Poloměr membrány je nepřímo úměrný napětí membrány, tedy se zvyšujícím se poloměrem membrány se bude napětí snižovat. Z dříve uvedených vztahů (14), (15) a (16) je zřejmé, že poloměr membrány je nepřímo úměrný frekvenci, a se zvyšujícím se poloměrem membrány se frekvence kmitů bude snižovat. Ze vztahu (1) pak vyplývá, že se snižující se frekvencí kmitů kmitající membrány se vlnová délka bude naopak prodlužovat. Obdobně tomu bude i u tenké obdélníkové membrány, která je předmětem zkoumání této práce. I zde je membrána napínána ve směru os  $x$  a  $y$  napětím na jednotku délky. Při zvětšování stran kmitající membrány se frekvence kmitů bude snižovat a vlnová délka prodlužovat.

### 2.2 Model C. Zwikkera a C.W. Kostena

Významnou prací [26], zabývající se šířením zvuku porézním flexibilním prostředím, na kterou navázalo několik dalších výzkumů, je teorie C. Zwikkera a C.W. Kostena. Autoři pohlíželi na porézní médium jako na směs dvou fází, vzduchu a pevného materiálu, které reagují rozdílně na zvukovou vlnu. C. Zwikkerova a C.W. Kostenova teorie navrhuje numerickou metodu pro výpočet činitele zvukové pohltivosti různých druhů materiálů. Tento teoretický model je schopen odhadnout činitel pohltivosti jako funkci tloušťky, porózy, vláknenného objemu a dalších vnitřních charakteristik. Z pohledu textilního je však mnohem důležitější teorie zvukové pohltivosti homogenními, porézními a pružnými materiály, kde je textilní materiál

uvažován jako nehomogenní vrstva, složená ze dvou homogenních fází. Jednou z nich tvoří vlákna a druhou vzduch mezi nimi. Matematická řešení základních rovnic iniciují existenci dvou vpřed směřujících a dvou zpětných vln, pohybujících se oběma fázemi vlákenné vrstvy [26].

## 2.3 Model Y. Shoshaniho a Y. Yakubova

Z předchozích poznatků a výzkumů C. Zwikkera a C.W. Kostena vychází také práce Y. Shoshaniho a Y. Yakubova [27]. Ta popisuje model pro odhad činitele zvukové pohltivosti netkaných textilních médií. Model je používán pro číselné výpočty některých strukturních charakteristik netkaných vlákenných textilií vysoce zvukově pohltivých v rozsahu slyšitelných frekvencí. Tyto výsledky mohou sloužit jako směrnice pro optimální přípravu akustických médií vyrobených textilním vrstvením. Teoretické zkoumání šíření zvuku skrz flexibilní pórovité prostředky má základní význam pro hodnocení kapacity absorpce zvuku textilií jako jsou tkaniny, netkané textilie atd. Shoshanih a Yakubov zkoumali několik vlákenných pavučin s proměnlivou porózitou, vyrobených z akrylových, bavlněných a polyesterových vláken. Z výsledných grafů je patrné, že při nižších a středních frekvencích ( $100 < f < 1000$  Hz) je činitel pohltivosti zvuku  $\alpha$  příliš nízký, a následně dochází k jeho rapidnímu růstu a také, že činitel pohltivosti je funkcí tloušťky vlákenné vrstvy. Pro každou frekvenci existuje specifická horní hranice tloušťky, nad kterou  $\alpha$  mírně klesá a následně zůstává konstantní. Vyšších hodnot  $\alpha$  je možno dosáhnout při vyšších frekvencích a při vyšších tloušťkách vlákenné vrstvy.

## 2.4 Studie a experimenty o pohlcování zvuku

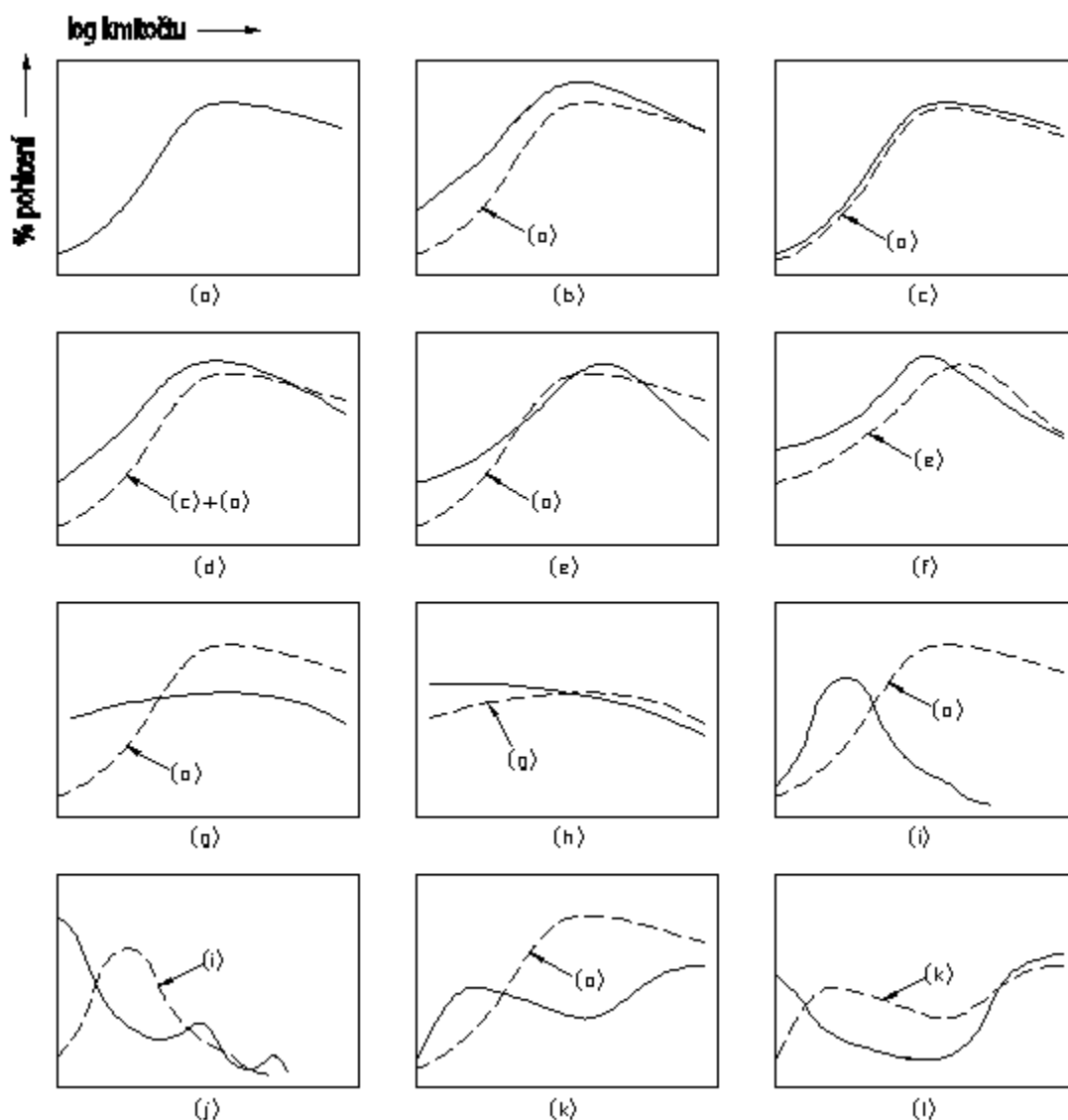
Ještě před několika lety inženýři v akustice obvykle řešili problémy snižování hluku jen zkusmo, a v některých případech jen na základě prostých rozumových úvah. Přejít od umění k vědeckější úrovni trval asi 25 let – od doby před druhou světovou válkou až do 60. let 20. stol. Velkou podporu, potřebnou k tomu, aby se snižování hluku vyvinulo ve vědu, poskytl průmysl dopravních prostředků a armáda. Mezi lety 1930 až 1940 se již uplatňovala opatření k snížení hluku u budov, automobilů, některých letadel, lodí a ve veřejné dopravě. V téže době 1930 – 1940 se začaly o vnitřní pochody při absorpci zvuku porézním akustickým materiálem zajímat university a vládní laboratoře. Výsledky tohoto výzkumu byly uveřejněny v časopise Journal of the Acoustical Society of America a v dalších zahraničních vědeckých časopisech.

V období druhé světové války vojáci museli pobývat dlouho v letadlech, tancích a na lodích. Důležitým problémem se stala nutnost dorozumívat se mezi sebou hlasově v těchto hlučných prostředích. Problém byl tak naléhavý, že v USA byly založeny dvě laboratoře na Harvardské univerzitě, aby prováděly speciální výzkum snižování hluku u bojových vozidel, a výzkum spojovací a komunikační techniky. Jedna z těchto harvardských laboratoří, Psycho-Acoustic Laboratory, řízená S. S. Stevensem, byla pověřena výzkumem psychologických hledisek snižování hluku a dorozumívání hovorem. Druhá laboratoř, Elektro-Acoustic laboratory, kterou řídil L. L. Beranek, byla pověřena výzkumem fyzikálních hledisek těchto problémů. Laboratoře vydávaly zprávy například o vlastnostech akustických materiálů, o vlivu hluku na člověka a o přístroji k měření hluku a chvění [8].

Jednou z prací elektroakustické laboratoře byl vývoj konstrukcí a materiálů o malé váze při daném snížení hluku. Brzy se zjistilo, že znalost odporu materiálu proti proudění, jakož i jeho tloušťka a hustota, mají prvořadou důležitost, zejména při stanovení stupně neprůzvučnosti. Dále se zjistilo, že prokládáním porézních rohoží neprostupnými fóliemi se zvyšuje stupeň neprůzvučnosti konstrukce, aniž dojde k zhoršení zvukové pohltivosti povrchu. Bylo také pozorováno, že je vhodné opatřit tenké panely vrstvou antivibračního materiálu, čímž se rovněž zvýší jejich stupeň neprůzvučnosti. Pracovní skupina v elektroakustické laboratoři objevila, že je výhodné používání rohoží z velmi jemné skelné vaty k tlumení hluku. Tento materiál byl původně vyvinut k použití ve filtrech plynových masek [8].

Řada důležitých prací o absorpci zvuku v akustickém materiálu, které byly během druhé světové války americkým odborníkům z pochopitelných důvodů nedostupné, byla publikována v Evropě Zwikkerem, Kostenem a Van den Eijkenem [28]. Tato pojednání a práce Kostenovy a Janssenovy [29] a dalších, ukázaly, že je nutné znát činitele struktury, dynamickou tuhost kostry materiálu, hustotu, odpor proti proudění, tloušťku a poróznost materiálu, aby bylo možné určit akustické chování pružných a tuhých porézních akustických konstrukcí.

V roce 1955 začal vycházet časopis Noise Control, který sloužil jako prostředek šíření informací o snižování hluku. Na jeho stránkách byly uveřejněny referáty z výročních symposií, čímž se zmenšuje počet míst, kde nutno hledat americkou literaturu o tomto předmětu [8].



Obrázek 21: Grafy znázorňující vliv na zvukovou pohltivost při vzduchové mezeře za pórovitým akustickým materiálem a bez vzduchové mezery, a vliv potahů na lící straně materiálu. a) bez potahu – bez vzduchové mezery, b) bez potahu – se vzduchovou mezerou, c) řídce tkaný potah – bez vzduchové mezery, d) řídce tkaný potah – se vzduchovou mezerou, e) perforovaný kovový potah – bez vzduchové mezery, f) perforovaný kovový potah – se vzduchovou mezerou, g) čtyři až šest vrstev nepropustného nátěru – bez vzduchové mezery, h) čtyři až šest vrstev plnicího nátěru – se vzduchovou mezerou, i) mřížoviny k omítání nebo sádrový podklad – bez vzduchové mezery vzadu, j) perforovaná deska nebo sádrový podklad – se vzduchovou mezerou, k) lehký potah z plastiku – bez vzduchové mezery, l) lehký potah z plastiku – se vzduchovou mezerou. Některé křivky se opakují na jiných grafech, jak je udáno příslušnými písmeny. Čerpáno z [8].

V současnosti je problémům hluku v architektuře věnována mnohem větší pozornost než kdykoliv dříve. Obr. 21 znázorňuje vliv vzduchové mezery za pórovitým akustickým materiálem (bez vzduchové mezery), a vliv potahů na lící straně materiálu

na zvukovou pohltivost. Nemalé využití mají i materiály na bázi skleněných vláken či minerálních vln, vyznačující se vynikajícími tepelně a zvukově izolačními vlastnostmi, nehořlavostí a rozměrovou stálostí. Proto se jich v široké míře využívá především ve stavebním a automobilovém průmyslu. Přispělo k tomu i to, že se na konci 70. let začala skleněná vlákna vyrábět novou moderní jednostupňovou technologií. Kromě uplatnění v technických výrobcích (hlavně pro svoji tepelnou odolnost od -80 do 170 °C), nacházejí skleněná vlákna uplatnění i v dekoračních tkaninách, zejména pro veřejné místnosti, divadla, kina apod. V roce 2000 pak zahájil výrobu nový provoz na výrobu mřížkových tkanin pro stavebnictví. Obr. 21-(i) znázorňuje vliv vzduchové mezery za mřížovinou k omítání na zvukovou pohltivost.

Účinky migrace vláken na akustické chování flexibilního vlákenného materiálu jsou experimentálně zkoumány v práci [30] M. D. Dahla, E. J. Ricea, a D. E. Groesbecka. Jedná se o materiál, který se skládá z válcově profilovaných vláken, uspořádaných v rouně zejména paralelně k povrchu stůcky. Zkoumaný materiál byl pokládán za anizotropní. Při testu bylo zkoumáno, zda závisí míra absorpce zvuku na uspořádání vláken v rouně, a na směru šíření zvuku paralelně nebo kolmo na rouno. Při kolmém dopadu zvukových vln ke směru vláken ve frekvenčním rozmezí od 140 do 1500 Hz, a objemové hmotnosti materiálu 0,0046 až 0,067 g/cm<sup>3</sup> byla naměřena silná rezonance, která zvýšila pohltivost materiálu. Model pro daný materiál indikoval, že tato rezonance byla dána vlákenným pohybem. Naopak při šíření zvuku paralelně ke směru vláken nebyla naměřena rezonance žádná.

Akustické absorpční vlastnosti netkané textilie byly studovány také v práci K. A. Jayaramana [31], kde se pod vedením Dr. P. Bankse-Leeho a Dr. B. Pourdeyhimiho zabýval důležitostí porozumění mikrostruktur a fyzikálních parametrů v konstruování vysoce výkonných akustických materiálů. Dále popisoval jak strukturní parametry jako jsou: typ, jemnost, měrný povrch a průřez vláken, orientace vláken, tloušťka materiálu, měrná hmotnost, odpor proti proudění vzduchu a porozita ovlivňují zvukovou pohltivost materiálu. Například jemná vlákna mohou snadněji převádět zvukové vlny než vlákna s větším průměrem. Při vyšším počtu jemných vláken dosáhneme stejné objemové hustoty jako u tlustších vláken, což vede k většímu měrnému povrchu vláken a tím ke vzrůstu odporu proti toku vzduchu. S větším odporem vzduchu vzrůstá tření mezi povrchem vláken a vzduchem. Při tření dochází k přeměně zvukové energie na energii tepelnou. K. A. Jayaraman se také zabýval vlivem chemických látek snižujících

hořlavost, typem upevnění zvukově pohltivého materiálu a vzduchovou mezerou na chování činitele zvukové pohltivosti.

V práci P. Berglunda [32] je jako vrstva absorbující zvuk použita malta, nanesená na vrchní vrstvu omítky. V budovách se aplikuje na vnitřních stěnách a střepech, a to buď přímo na beton nebo na jiný nosný materiál, popřípadě na spodní izolační materiál, jako je např. minerální vlna. Tato malta na vrchní vrstvu omítky obsahuje celulozová vlákna, polyfosforečnan amonný, expandovaný materiál a vodní sklo.

Práce U. Donnera, W. Wilsona a S. Schadea [33] se zabývá výzkumem víceúrovňového porézního absorpčního materiálu, který má optimální absorpční vlastnosti díky uspořádání minimálně dvou různých absorpčních vrstev. Absorbér je určen k pohlcování zvukových vln, zvláště v nízkofrekvenčním rozsahu a je navrhnut tak, aby mohl plnit funkci nástěnného prvku, popřípadě může být zavěšen na stropu místnosti, eventuálně může sloužit jako volně stojící konstrukce.

Zvuková pohltivost je dále zkoumána v práci C. Defilippi [34], kde je k absorpci zvuku použit panel, který je vyroben převážně z textilních vláken. Panel se vyznačuje vysokou absorpcí zvuku, a může být zkonstruován ve formě plochého nebo trojrozměrného dekoračního prvku. Je používán k zlepšení akustických vlastností místností, ve kterých dochází k nevhodné rezonanci nebo dozvuku. Panel se skládá z masy vláken, která zajišťují absorpci zvuku. Povrch panelu může být plochý, rýhovaný nebo prostorově tvarovaný. Panel se skládá z několika vrstev, z nichž jedna vrstva má funkci rezonátoru. Panel je vyráběn lisováním za vhodné teploty.

Zařízení [35] je určeno pro tlumení hluku v akustických prostorech, a má na stěně nebo krytu tlumeného prostoru uspořádaný rozpěrný element, vytvořený ve tvaru rámu, na kterém je uspořádan deskový pohlcovač, který plochou uzavírá dutý prostor. Na deskovém pohlcovači je uspořádan pohlcovač porézní. Zařízení tlumí hluk v širokopásmové frekvenční oblasti.

Práce Y. Y. Leeho a E. W. M. Leeho [36] se podrobně zabývá pohlcováním zvuku flexibilních tvarovaných mikro-děrovaných panelů se vzduchovou mezerou. V práci je použit teoretický model, který je doplněn o vlnovou rovnici, která je vytvořena pro předpověď pohlcování zvuku. Tento model uvažuje jak symetrické, tak asymetrické zvukové odrazy. Další model je vyvinut tak, že uvažuje pouze jednotlivé akustické módy. Hlavním cílem je pohlcování zvuku v širším frekvenčním rozsahu, čehož je docíleno pomocí dvou mikro-děrovaných panelů, které jsou opatřeny rezonančními dutinami. Pohlcování zvuku může být zvýšeno regulováním křivosti



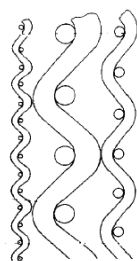
povrchu panelu tak, aby rezonanční kmitočet byl společný pro oba panely. V práci je také zkoumán vliv parametrů jako je například úhel dopadu, zakřivení atd. Výsledky, vypočítané jak pro jeden, tak i pro oba absorbéry, ukazují dobrou shodu s měřením.

Textilie použité v interiéru vozu do čalounění a dalších vnitřních částí jsou jednou z možností absorpce zvuku. Od použití netkaných textilií v oblasti pohlcování zvuku se upouští pro jejich menší estetičnost ve srovnání s tkanými a pletenými strukturami. Práce T. Diase a R. Monaragala [37] se zabývá pohlcováním zvuku pleteninou, a výsledky srovnává s teoretickým modelem.

Také práce T. Diase, R. Monaragala a E. Layho [38] se zabývá nově vyvinutou pleteninou, která byla testována jako mikro děrovaný panel. Simulací byla zjišťována schopnost pohlcování zvuku v závislosti na strukturních vlastnostech pleteniny. Tato matematická analýza pak byla potvrzena vhodnou pleteninou. Výsledky ukázaly významné zlepšení pohlcování zvuku ve srovnání s rovinnými pletenými strukturami.

J. Žikovský, P. Bezděk a K. Zeifl se ve své práci [39] zabývají porézním nehořlavým podhledovým panelem se zvukoabsorpčními účinky, který je tvořen ze zrněk přírodního materiálu – barveného písku, pojeného epoxidovou pryskyřicí tak, aby se v něm vytvářely vzduchové kanálky ve formě multicelulárního vzduchového labyrintu. Zvuková energie prostupující tímto panelem se tlumí třením vzduchových částic o velkou plochu ostrých zrn písku, vytvářejícího multicelulární vzduchový labyrint.

Práce U. Muellera [40] se týká tkané vrstvené desky, která je určena k pohlcování zvuku. Tkaná vrstvená deska musí obsahovat přinejmenším tři navrstvené a částečně pájené vrstvy. Jedna vrstva má relativně hrubou strukturu, další vrstva má jemnou strukturu a zbývající vrstva má pak strukturu střední (viz obr. 22). Součástí vrstvy jsou i kovová vlákna, která jsou do struktury buď zatkána nebo přidána ve formě netkané textilie.



**Obrázek 22: Tkaná vrstvená deska. Čerpáno z [40].**

Nově vyvinutý vzorek textilního materiálu [41] ze 100% bavlny je vyroben speciálně tkanou strukturou, která má vysokou pórovitost, což se využívá hlavně v oblasti zvukové pohltivosti. Tato dvouvrstvá clona je určena nejen k pohlcování zvuku, ale také jako světelná izolace. Jedna vrstva byla zhotovena ze 100% bavlny, zatímco další byla zhotovena ze směsi CO/PES v poměru 35/65. Vrstvy jsou vzájemně odděleny vzduchovou mezerou, kterou lze měnit tak, aby bylo dosaženo optimální účinnosti. Byl studován účinek vzduchové mezery za a mezi vrstvami v závislosti na zvukové pohltivosti, s cílem dosáhnout co možná nejlepších výsledků pro danou konkrétní aplikaci.

Vlněná a skleněná vlákna jsou již osvědčenými materiály pro ochranu proti hluku. Ovšem vyšší hodnoty tuhosti a pevnosti omezují řadu použití těchto vláken. Za účelem snížení těchto omezujících vlastností byla vyvinuta vata z kovových vláken [42]. Vata může být vyplněna jak vzduchem, tak i různými druhy kapalin. To znamená, že změna kapaliny stejně jako struktura absorbéru mohou ovlivnit hodnotu absorpce. Nejjednodušším případem pohlcovače se stává vrstvená děrovaná deska. Tento základní model je pak zobecněn dalším případům vat z kovových vláken. X. Wang v práci jako příklad kapaliny použil ricinový olej. Zjistil, že je vhodný při pohlcování zvuku v oblasti kolem 500 Hz. V práci bylo dále zjištěno, že silikonový olej vykazuje vyšší hodnoty pohlcování zvuku. V práci je demonstrováno, že lze tloušťku absorbéru snížit až o více než  $\frac{3}{4}$ , pokud je absorbér ponořen do silikonu, oproti ponoření do ricinového oleje. V práci je také ukázáno, že silikonový olej je pro pohlcování zvuku lepší a vhodnější.

V práci [43] je zkoumáno šíření zvukových vln skrz pórovitý materiál, založený na teoretické formulaci Zwikkera a Kostena pro šíření zvuku v pórovitém materiálu. Na základě této teorie P. Gialamas, D.A. Manolas a D.T. Tsahalís vytvořili program v Matlabu, který simuluje experimentální konfiguraci, které se skládá z dutiny, dvojité stěny, tvořené dvěma paralelními hliníkovými panely, a dozvukové místnosti. V dozvukové místnosti je umístěn reproduktor, sloužící jako zdroj zvuku. V práci jsou srovnávány výsledky z Matlabu a z experimentu.

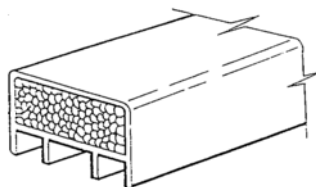
Základní mechanismus zvukové absorpce různých zvukově pohltivých materiálů je obecně vysvětlován jako přeměna zvukové energie na energii tepelnou. Důležitým prvkem, který řídí přeměnu zvukové energie na energii tepelnou, je struktura materiálu. Pórovitost, rezonance a druh výplně obecně klasifikují geometrickou strukturu absorpčního materiálu. V této studii D. H. Chuna a H. J. Changa [44] je zkoumán vliv

různých parametrů netkané textilie (jako je např. dostava textilu, konečná úprava textilie, prodyšnost, tloušťka textilie, počet děr) na hodnoty zvukové pohltivosti, a to pomocí impedanční trubice.

V práci [45] je popsána metoda měření zvukové pohltivosti divadelní židle s lidskou figurínou. Metoda zahrnuje divadelní židli, opatřenou absorpčním materiálem, a figurínu z absorpčního materiálu. Jsou zjišťovány změny zvukové pohltivosti mezi divadelní židlí, na níž je usazena figurína, a samotnou divadelní židlí.

V práci I. Šnejdárka a J. Žukovského [46] je pro akustické úpravy uzavřených prostorů použita zvukoabsorpční závěsná soustava, složená z akustických prvků a závěsných prostředků. Akustické prvky jsou tvořeny nosnou částí tvaru obdélníka, na kterou je připevněn akusticky pohltivý materiál. K hornímu a dolnímu okraji nosné části jsou připevněny spojovací prvky, kterými jsou akustické prvky vzájemně zavěšeny do svislých řetězců. Horní akustický prvek každého řetězce je zavěšen na závěsný člen otočný kolem svislé osy a posuvně uložený na vodorovném profilovém nosníku.

Práce Y. K. Taeho [47] se týká hliníkového rámu, jehož dutá část je vyplněna tepelně izolační pěnou (viz obr. 23). Pěna je použita do dutých částí hliníkového rámu u oken a dveří, zejména pro zlepšení tepelně izolační účinnosti a zvukové pohltivosti. Podle tohoto řešení se významně zlepši tepelně izolační účinnost a zvuková pohltivost v budovách.



**Obrázek 23: Hliníkový rám s izolační pěnou. Čerpáno z [47].**

K pohlcování zvuku lze dále dle [48] použít tzv. nízkofrekvenční tlumič hluku (viz obr. 24), který se skládá z jedné nebo několika tlumicích vložek. Každá tlumicí vložka sestává z rámu, jehož ramena jsou vytvarována z plechu do tvaru „U“, do něhož je vložena a pomocí vyztužovacích příček upevněna zvuk pohlcující výplň. Povrch výplně je střídavě proveden jako volná stěna, kde je zvuk pohlcující materiál pokryt pouze tenkou (zvukově prostupnou) vrstvou z netkané textilie, skelné tkaniny nebo folií, a střídavě je pokryt krycím plechem tak, že volná stěna zvuk pohlcující výplně se střídá se stěnou pokrytou krycím plechem, minimálně dvakrát vedle sebe na lícním i rubovém povrchu zvuk pohlcující výplně.



Obrázek 24: Nízkofrekvenční tlumič hluku. Čerpáno z [48].

Také V. A. Zorin, A. A. Ivanchuk, D. M. Karcinos, A. E. Rutkovskii a V. G. Smirnov se své práci [49] zabývali tím že, zvukově pohltivé vlastnosti závisí na takových parametrech materiálu, jako je pórovitost, vláknenný průměr, typ provázání a množství vláken v přízi. Vhodnou volbou průměru vláken, typu provázání a počtu nití v přízi je možné dosáhnout optimální pórovitosti, která souvisí s hodnotou činitele zvukové pohltivosti. S klesajícím průměrem vláken dochází k posunu činitele zvukové pohltivosti k vyšším hodnotám. Stejně tak s rostoucím počtem vláken v niti dochází k zvýšení odporu proti proudění a činitel zvukové pohltivosti tak může nabývat vyšších hodnot.

V práci A. C. F. Chena, H. L. Williamse [50] byly studovány zvukově pohltivé vlastnosti polymerů v závislosti na teplotě, chemickém složení a dalších. Viskoelastické polymery byly smíchány s polymery tuhými za účelem získání lepších akustických vlastností. V případě polymerních pěn bylo zjištěno, že chemická povaha polymeru je nejdůležitější faktor řídící tlumení zvuku. Velmi dobré zvukově pohltivé vlastnosti byly zjištěny u polyuretanové pěny. Teplotně závislé zvukové vlastnosti různých systémů polymerů jsou pak diskutovány v rámci viskoelastické teorie polymerů

V práci K. U. Ingarda [51] jsou zkoumány zvukové vlastnosti porézní vrstvy doplněné pevnou stěnou. Je zjišťován celkový odpor, odraz a koeficient absorpce jako funkce frekvence a úhlu dopadu. Je také zkoumána možnost použití flexibilního materiálu za účelem vytvoření rezonance při nízké frekvenci s vysokým pohlcením bez významné ztráty v pásmu nízkých frekvencí.

Bolton a další se zabývají programem pro předpověď akustických vlastností obecného homogenního porézního materiálu [52]. Při poskytnutí vstupní sady mikrostrukturních parametrů porézního materiálu lze předpovědět jeho akustické vlastnosti.

O zvukové pohltivosti bylo napsáno mnoho studií, které se více či méně zabývají zvukovou pohltivostí materiálů s obsahem vláken, nebo netkaných textilií, nemnoho bylo ale napsáno o zvukové pohltivosti nanovláken.

Vliv nanovláknenných vrstev na zlepšení zvukové pohltivosti u porézních textilií byl zkoumán v práci [53]. Z měření vzorků bez nanovrstev bylo zjištěno, že netkané textilie z druhotných surovin mohou v oblasti tlumení zvuku bez výrazného rozdílu nahradit polyesterové netkané textilie. Po nanesení nanovrstev byl prokázán pozitivní vliv na maximální hodnotu činitele zvukové pohltivosti, a to především v oblastech nízkých frekvencí, který narůstal s počtem rezonátorů. Měření dále ukázalo, že vzorky s 8-mi rezonátory mají vyšší nárůst činitele zvukové pohltivosti v nízkých frekvencích, než vzorky s 6-ti rezonátory. Toto platilo jak pro druhotné suroviny, tak pro netkané textilie z polyesteru. Dále byl v práci prokázán vliv složení vzorků z druhotných surovin na činitele zvukové pohltivosti ve vyšších frekvencích. Druhotné suroviny mají vlivem menšího počtu bikomponentních vláken menší ohybovou tuhost. Jsou proto pružnější než netkané textilie z polyesteru, z tohoto důvodu lépe tlumí akustickou energii při vyšších frekvencích.

Vliv nanovláknenné vrstvy na zvukově pohltivé vlastnosti netkaných textilií zkoumá také práce [54]. Práce se podrobně zabývá vlivem nanovláknenné vrstvy a vlivem její plošné hmotnosti na činitele zvukové pohltivosti podkladové netkané textilie. Z provedených měření vyplynulo, že vzorky se zvětšující se tloušťkou vykazují jasně lepší zvukově pohltivé vlastnosti. Bylo zjištěno, že čím větší je plošná hmotnost nanovláknenné vrstvy, tím lepší je zvuková pohltivost při nižších frekvencích. V práci byl také prokázán pozitivní vliv plošné hmotnosti na maximální hodnotu činitele zvukové pohltivosti, která se zvyšující se plošnou hmotností narůstala.

Chování nanovrstvy, podrobené působení zvukových vln, zkoumá také práce [55]. V práci bylo zjištěno, že s rostoucí velikostí vzduchového polštáře se křivka činitele zvukové pohltivosti posunuje do vyšších hodnot. Vyšší plošná hmotnost nanovláknenné vrstvy přispívá ke zlepšení zvukově pohltivých vlastností. V práci je také zkoumána absorpční soustava, tvořená současně několika vyrobenými absorpčními vzorky. V soustavách, kde byla vytvořena vzduchová mezera mezi odrazivou stěnou a souborem absorpčních vzorků, stoupaly křivky prudce do vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti. V případě vrstvení vzorků přímo od odrazivé stěny docházelo k růstu křivky pozvolna v porovnání s předchozím případem, ale s přibývajícími absorpčními členy stoupaly křivky rychleji do vyšších hodnot.

## 3. Experimentální část

### 3.1 Cíl práce

Cílem této práce bylo zjistit vliv tloušťky papírových mezikruží s nanosenou nanovláknennou vrstvou, dále vliv velikosti ok mřížky a plošné hmotnosti nanovrstvy, podrobené působení zvukových vln v určitém rozsahu frekvencí na průběh chování činitele zvukové pohltivosti. Měřené údaje byly zjišťovány při vzdálenosti absorpčního členu 30 mm od odrazivé stěny.

### 3.2 Úkoly

Pro dosažení stanoveného cíle musely být splněny tyto úkoly:

1. vyrobit různé velikosti ok mřížek,
2. na mřížky s různými oky zvláknit nanovláknennou vrstvu o různých plošných hmotnostech,
3. vyrobit papírová mezikruží o různých tloušťkách,
4. zvláknit nanovláknennou vrstvu o různých plošných hmotnostech na mezikruží,
5. změřit vzorky v impedanční trubici vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny,
6. změřit v impedanční trubici také samotné mřížky o různých velikostech ok ve vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny,
7. změřit v impedanční trubici samotná papírová mezikruží o různých tloušťkách ve vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny.

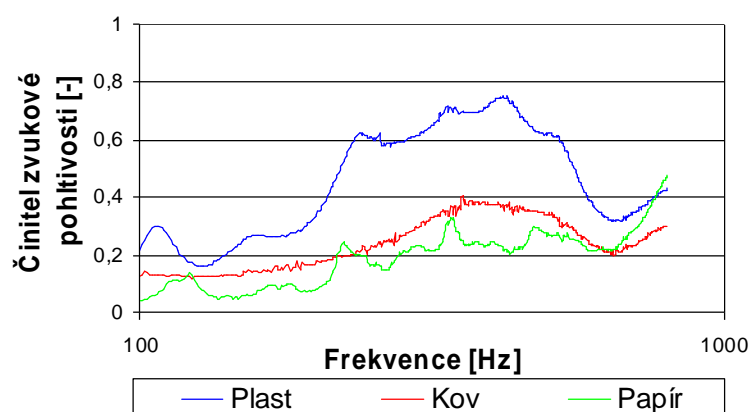
#### 3.2.1 Předběžný experiment

Na začátku této práce bylo nejprve potřeba určit směr, jakým by se měl výzkum ubírat. Pro získání konstantní napínací síly zvlákněné vrstvy byly použity kroužky z PVC, z hliníkové slitiny a z tvrdého papíru, všechny o vnitřním průměru 29 mm a vnějším průměru 32 mm. Kroužky z PVC a z hliníkové slitiny byly připevněny na podkladový pečicí papír a na podkladovou netkanou textilií *spun-bond*, a byla na ně zvlákněna nanovláknenná vrstva elektrostatickým zvlákňováním pomocí laboratorního zařízení Nanospider. Z hmotnosti nanovrstvy, která byla vážena na vahách s přesností 0,0001 g, byla vypočtena průměrná hodnota plošné hmotnosti 8,754 g/m<sup>2</sup>. Při zvlákňování došlo k nežádoucímu otisku struktury podkladové vrstvy *spun-bond* do nanovláknenné vrstvy, proto byl k dalšímu výzkumu použit pouze pečicí papír.

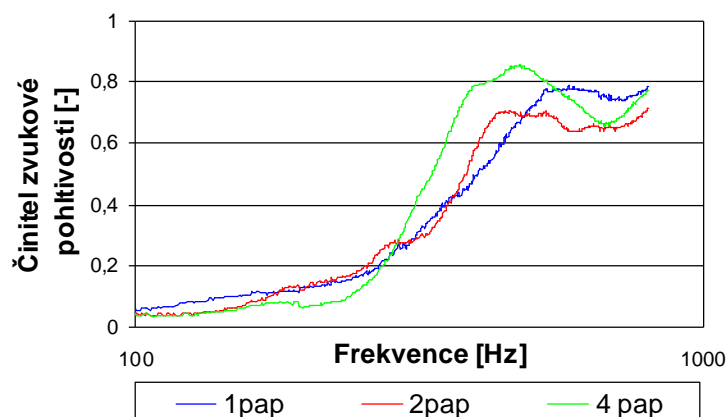
Výroba papírových mezikruží byla odlišná, jejich vnější průměr byl vyražen až s nanosenou nanovláknennou vrstvou. Všechny vzorky byly vyrobeny za stejných klimatických podmínek. Odtahová rychlost podkladového pásu byla přibližně 0,04 m/min ( $f = 3$  Hz). Teplota ve zvláknovacím prostoru byla 21°C, relativní vlhkost vzduchu 32 % RH, velikost proudu 0,17 mA a zvláknovací napětí 50 kV. Vzdálenost zvláknovacího válečku od kolektoru byla 220 mm, rychlost otáčení válečku 2,5 ot/min, průměr zvláknovacího válečku 20 mm. Polovina z celkového množství vyrobených vzorků byla po zvláknění navíc zesítněna za teploty 140°C po dobu 4 minut.

Při následném měření v impedanční trubici byla zřetelněji vidět změna činitele zvukové pohltivosti v závislosti na měnící se frekvenci u nezesíťovaných vzorků než u zesíťovaných (obr. 26 a 27). Dále bylo z grafu patrné, že u kovových kroužků nebyla absorpční maxima výrazná, u kroužků z PVC byla málo zřetelná a docházelo k nežádoucímu „odlepování“ nanovrstvy z kroužku, u papírových mezikruží byla absorpční maxima zřetelná jasněji (obr. 25), proto byla pro další výzkum zvolena nezesíťovaná nanovláknenná vrstva na papírovém mezikruží.

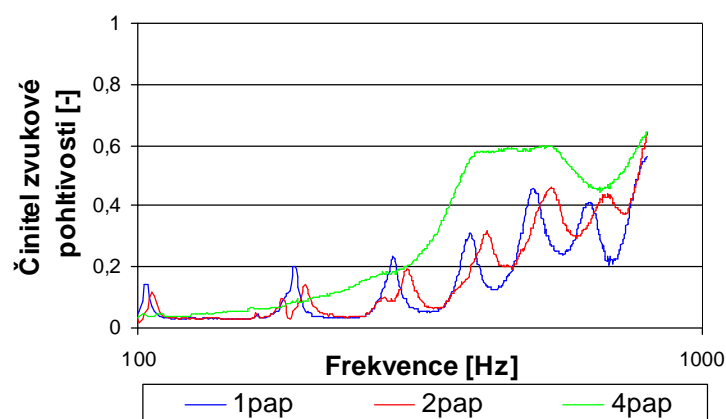
Maxima činitele zvukové pohltivosti se s rostoucí vzdáleností od odrazivé stěny (s rostoucí vzduchovou mezerou), posouvají k nižším frekvencím (obr. 28). Nanovláknenná vrstva plní funkci membrány, rezonující na nízké frekvenci. Tento charakter je dán nanorozměry mezivláknenných pórů. Proto byla volena vzdálenost od odrazivé stěny 30 mm.



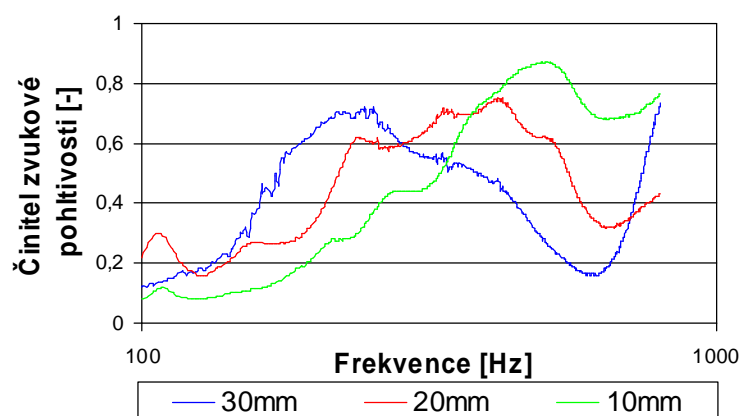
**Obrázek 25:** Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro zesíťovanou nanovláknennou vrstvu nanosenou na mezikruží z plastu, kovu a papíru ve vzdálenosti 20 mm od odrazivé stěny.



**Obrázek 26:** Závislost činitele zvukové pohltivosti pro zesíťovanou nanovláknennou vrstvu nanesenou na papírové mezikruží o tloušťkách 1, 2 a 4 vrstvy papíru, ve vzdálenosti 10 mm od odrazivé stěny.



**Obrázek 27:** Závislost činitele zvukové pohltivosti pro nezesíťovanou nanovláknennou vrstvu nanesenou na papírové mezikruží o tloušťkách 1, 2 a 4 vrstvy papíru, ve vzdálenosti 10 mm od odrazivé stěny.



**Obrázek 28:** Závislost činitele zvukové pohltivosti pro zesíťovanou nanovláknennou vrstvu nanesenou na mezikruží z plastu ve vzdálenosti 30, 20 a 10 mm od odrazivé stěny.

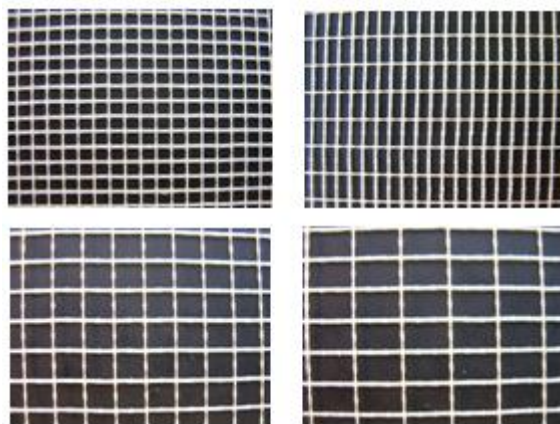


### 3.3 Příprava vzorků

#### 3.3.1 Příprava mřížky

Základem pro výrobu mřížky s různou velikostí ok posloužila stavební armovací tkanina typ R117 A01, výrobce Saint-Gobain Vertex, s.r.o., určená do akrylátových omítek. Tato mřížová tkanina bílé barvy má dle výrobce plošnou hmotnost  $145 \text{ g/m}^2$  a rozteče ok mají jmenovitý rozměr  $4,5 \times 3,5 \text{ mm}$  a tloušťku  $0,47 \text{ mm}$ .

Z mřížky byly nastříhány 4 pásy o rozměrech  $2,5 \times 0,4 \text{ m}$  pro zhotovení čtyř různých velikostí ok. Jako nejmenší rozměr ok byl zvolen rozměr ok mřížky, daný přímo výrobcem. Nejbližší větší oko bylo vytvořeno vystřížením útkové nitě mezi dvěma základními oky. Další větší oko bylo vytvořeno vystřížením útkové a osnovní nitě mezi čtyřmi základními oky. Největší oko pak vzniklo vystřížením dvou útkových a jedné osnovní nitě mezi šesti základními oky (viz obr. 29). Následně byl každý pás mřížek připevněn na podkladový pečící papír.

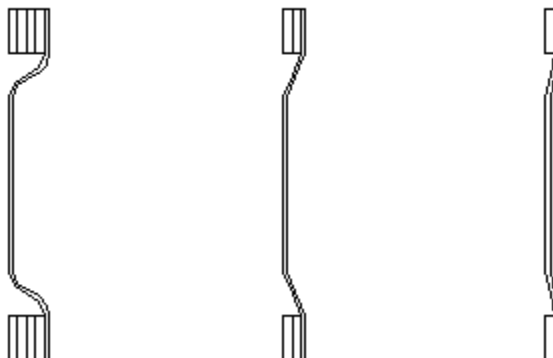


Obrázek 29: Skleněná mřížka se čtyřmi velikostmi ok.

#### 3.3.2 Příprava papírových vrstev

Pro získání konstantní napínací síly zvlákněné vrstvy bylo zapotřebí použít mezikruží, po předchozích experimentech pak byla zvolena mezikruží papírová. K jejich výrobě byl použit kladívkový papír formátu A4. Papíry byly použity jednak v jedné základní vrstvě, a jednak byly dále vrstveny lepením, a to 2 ks a 4 ks na sebe (viz obr. 30), pro získání různé napínací síly při zvláknování nanovlákněné vrstvy. Celkem byly takto zhotoveny čtyři sady papírů, každá o třech uvedených tloušťkách. Dále byly do všech papírů vyseknuty kruhové otvory s vnitřním průměrem  $29 \text{ mm}$ .

Následně byly papíry připevněny na podkladový pečicí papír, a to každá sada na samostatný papír.



**Obrázek 30: Znázornění různých tloušťek papírových mezikruží s nanovláknennou vrstvou**

### 3.3.3 Tvorba membrány

Pro výrobu membrány byla použita nanovláknenná vrstva, vytvořená elektrostatickým zvlákňováním na laboratorním zařízení Nanospider, ze směsi 16% roztoku polyvinylalkoholu s přídavkem 40% glyoxalu, 85% kyseliny fosforečné a destilované vody (viz Příloha 2).

Plošná hmotnost zvlákňované vrstvy nanovláken byla přímo regulována odtahovou rychlostí podkladového pásu. Tímto způsobem byly vytvořeny čtyři plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy, a to dle nastavených frekvencí 3 Hz (odpovídající rychlosti přibližně 0,04 m/min), 6 Hz (odpovídající rychlosti přibližně 0,09 m/min), 9 Hz (odpovídající rychlosti přibližně 0,14 m/min) a 12 Hz (odpovídající rychlosti přibližně 0,18 m/min).

Během zvlákňování na laboratorním zařízení Nanospider byly udržovány konstantní teplota a relativní vlhkost vzduchu pomocí vestavěného klimatizačního zařízení. Teplota v zvlákňovacím prostoru byla 22°C, relativní vlhkost vzduchu 34 % RH, velikost proudu 0,17 mA a zvlákňovací napětí 50 kV. Vzdálenost zvlákňovacího válečku od kolektoru byla 220 mm, rychlost otáčení válečku 2,5 ot/min, průměr zvlákňovacího válečku 20 mm.

Nanovláknenná vrstva byla zvlákňována jednak na mřížky ze skleněných vláken s různou velikostí ok, a jednak na papírová mezikruží o různých tloušťkách. Jako

podkladová vrstva byl v obou případech použit pečící papír, tím se značně usnadnilo snímání vyrobené nanovrstvy, což bylo důležité pro další zpracování této vrstvy.

Zvlákňování na pásy mřížové tkaniny probíhalo se skokovým zvyšováním odtahové rychlosti pásu, aby byly docíleny čtyři plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy. Zvlákňování na papírové vrstvy s otvory bylo prováděno vždy jinou určitou konstantní rychlostí odtahového pásu.

**Tabulka 4: Odtahová rychlost pásu při zvlákňování nanovlákněných vrstev.**

Frekvence [Hz]	3	6	9	12
Odtahová rychlost [m/min]	0,04	0,09	0,14	0,18

### 3.4 Výroba vzorků

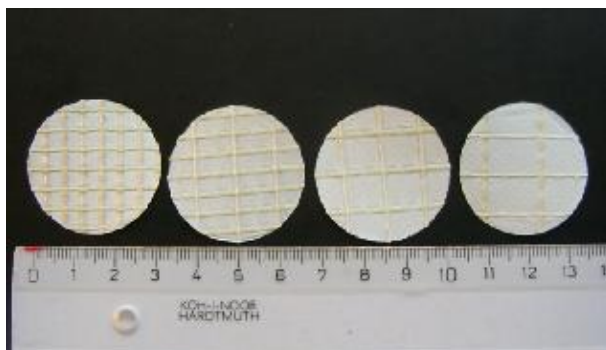
Dokončení vzorků bylo provedeno s pomocí hydraulického lisu a kruhového razníku o průměru 32 mm.

V případě mřížových pásů bylo vyraženo náhodně vždy pět vzorků od každé plošné hmotnosti a každé velikosti ok, celkem 80 kusů.

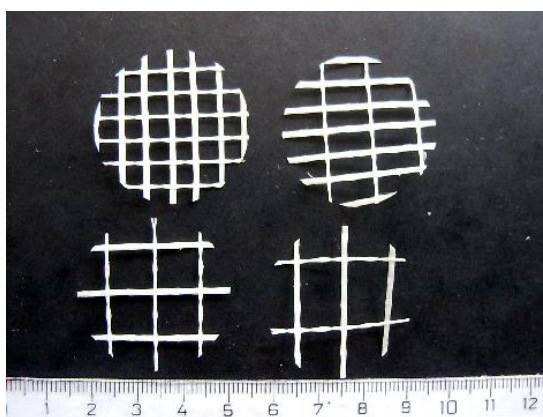
V případě papírových vrstev bylo vyraženo vždy pět vzorků od každé plošné hmotnosti a každé tloušťky papíru, celkem 60 kusů. Zde muselo být vyrážení prováděno v konkrétních místech papírových vrstev, a to s maximální možnou přesností s ohledem na již dříve vyražené otvory, aby tak vznikla soustředná mezikružít (viz obr.31).



**Obrázek 31: Vzorky papírových mezikružít o různých tloušťkách - 1, 2 a 4 s nanosenou nanovlákněnou vrstvou.**



**Obrázek 32: Vzorky mřížek s různou velikostí ok s nanosenou nanovláknennou vrstvou.**



**Obrázek 33: Vzorky mřížek s různou velikostí ok.**

Pro určení přesné velikosti ploch nanovrstvy v mřížce vzorků (viz obr. 32) bylo nutno změřit velikosti ok v mřížce. U vzorků s nejmenší mřížkou byla měřením 160 náhodně zvolených ok zjištěna průměrná hodnota rozměru  $4,1 \times 4,3$  mm, směrodatná odchylka  $0,11 \times 0,09$  mm. U vzorků s druhou nejmenší mřížkou byla měřením 128 náhodně zvolených ok zjištěna průměrná hodnota rozměru  $9,4 \times 4,1$  mm, směrodatná odchylka  $0,11 \times 0,11$  mm. U vzorků s třetí velikostí mřížky byla měřením 96 náhodně zvolených ok zjištěna průměrná hodnota rozměru  $9,0 \times 9,4$  mm, směrodatná odchylka  $0,12 \times 0,11$  mm. U vzorků s největší mřížkou byla měřením 64 náhodně zvolených ok zjištěna průměrná hodnota rozměru  $9,0 \times 14,2$  mm, směrodatná odchylka  $0,12 \times 0,05$  mm.

### 3.4.1 Měřicí zařízení

Měření všech vyhotovených vzorků probíhalo pomocí dvou mikrofonové impedanční trubice typu 4602, umístěné na Katedře strojů průmyslové dopravy TUL. Byly měřeny vzorky nanovláknenných vrstev o čtyřech plošných hmotnostech, nanesených jednak na mřížkách ze skleněných vláken se čtyřmi velikostmi ok, a dále na papírových mezikruží o třech různých tloušťkách.

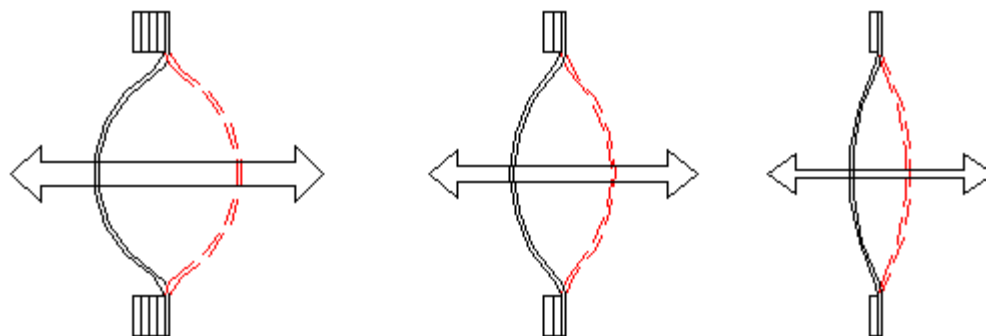
Z důvodu předpokládané chyby měření, způsobené nestejnou měrností při výrobě i manipulací se vzorky, byla tato eliminována proměřením pěti vzorků od každého druhu (viz Příloha 7 až 10). Získané hodnoty ze všech pěti měření byly pomocí měřicího softwaru převedeny a graficky zpracovány v programu Excel. Z grafů je vidět změna činitele zvukové pohltivosti v závislosti na měřící se frekvenci a naměřené výsledky lze pomocí jednotlivých grafů velice přehledně porovnávat.

Přístroj byl před každým měřením kalibrován pro danou absorpční soustavu.

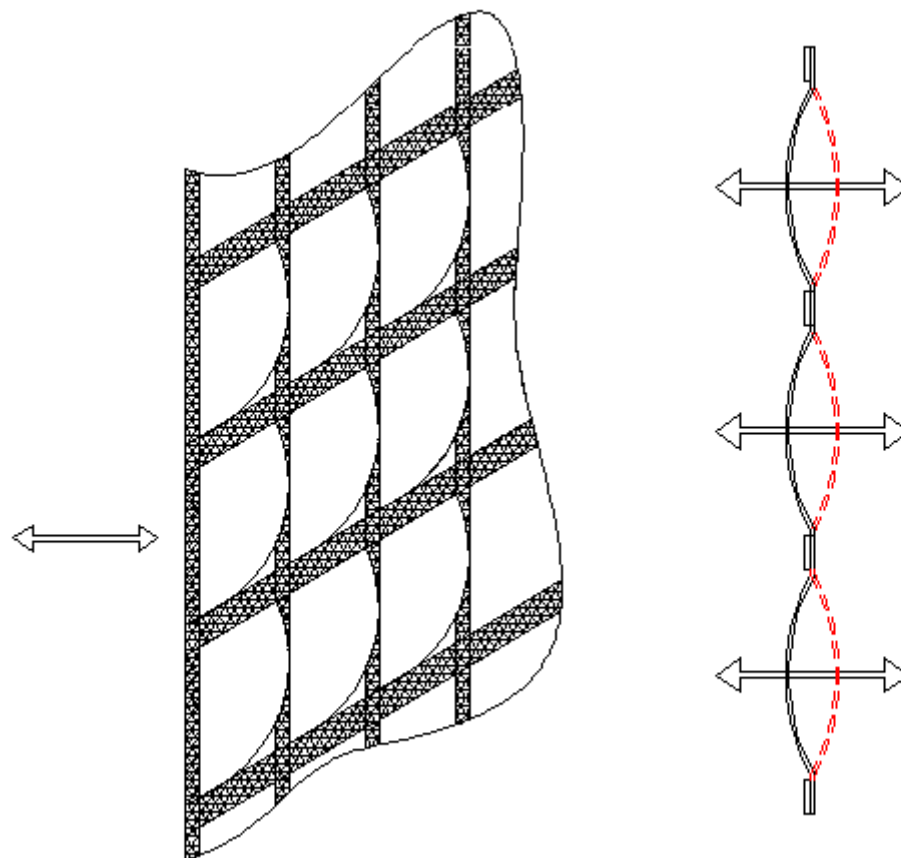
## 3.5 Postup měření

### 3.5.1 Měření na dvou mikrofonové impedanční trubici

Všechny zhotovené vzorky byly proměřovány v impedanční trubici (viz obr. 15). Odrazivá stěna byla nastavena do vzdálenosti 30 mm od nanovláknenné vrstvy. Postupně bylo proměřeno 80 vzorků nanovláknenné vrstvy na mřížce (obr. 35) ze skleněných vláken a 60 vzorků nanovláknenné vrstvy na papírových mezikruží (obr. 34).



**Obrázek 34: Znázornění průhybu nanovláknenné vrstvy v závislosti na tloušťce papírového mezikruží**



Obrázek 35: Znázornění průhybu nanovlákněné vrstvy v mřížce.

### 3.5.2 Měření plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy

Plošná hmotnost se vypočte jako poměr hmotnosti vztažený na jednotku plochy dle vztahu (26). Plošná hmotnost  $m_{PL}$  se vyjadřuje v  $\text{g.m}^{-2}$ . U vzorku určíme jeho plochu a hmotnost

$$m_{PL} = \frac{m}{S}, \quad (26)$$

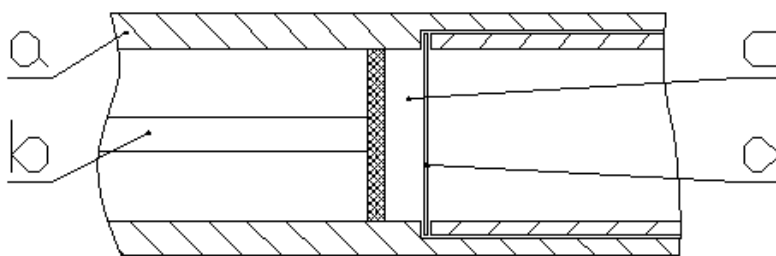
kde  $S [\text{m}^2]$  je plocha vzorku a  $m [\text{g}]$  je hmotnost vzorku. Z hmotností nanovlákněných vrstev, které byly váženy na vahách s přesností na 0,0001 g, byla vypočtena jejich průměrná plošná hmotnost (viz tab. 5).

Tabulka 5: Průměrná plošná hmotnost nanovrstev.

Frekvence [Hz]	3	6	9	12
Průměrná plošná hmotnost [ $\text{g.m}^{-2}$ ]	5,7	2,6	2,2	1,7
Směrodatná odchylka [ $\text{g.m}^{-2}$ ]	0,2	0,15	0,03	0,01

### 3.5.3 Měření samotné mřížky a samotného papírového mezikruží

Mřížka byla umístěna do impedanční trubice (viz obr. 15 a 36). Nejprve byla nastavena odrazivá stěna, představována pohyblivým pístem, do vzdálenosti 30 mm od měřené mřížky (obr. 36). Měření bylo provedeno vždy u 5ti vzorků mřížek od každé velikosti ok, celkem 20 vzorků. Stejný postup byl proveden i při měření samotných papírových mezikruží.



**Obrázek 36: Princip měření vzorků.**

**a) trubice, b) píst, c) vzduchová mezera, d) vzorek.**

### 3.5.4 Měření tloušťky nanovrstvy

Pro zjištění tloušťky nanovrstvy byly pořízeny snímky struktury řezu nanovlákněné vrstvy, nasnímané pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu VEGA TS 5130, jehož základní funkcí je získání zvětšeného obrazu zkoumaného objektu (viz Příloha 1).

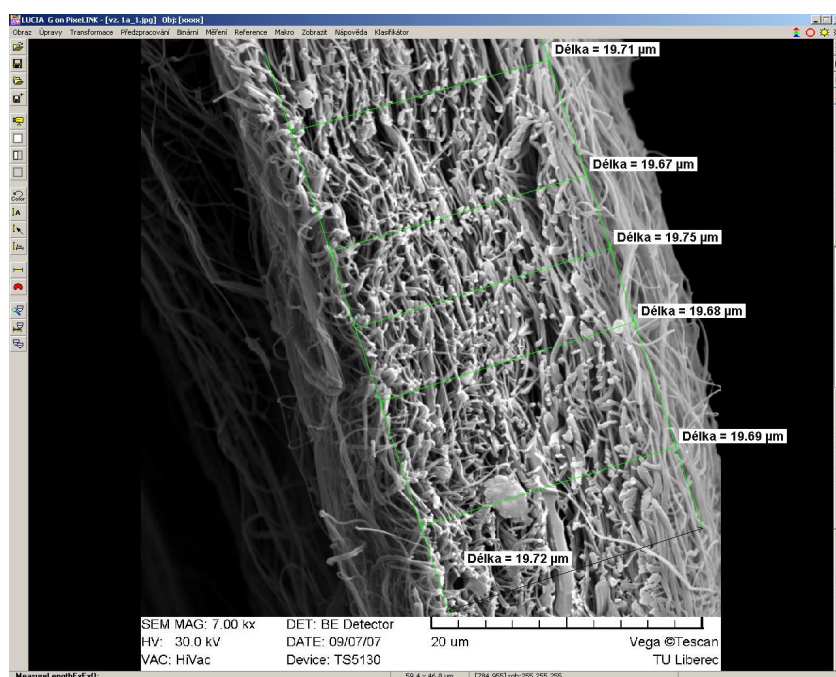
Průměr nanovláken je výrazně menší než vlnová délka světla, proto je nelze pozorovat pod optickým mikroskopem, ale k jejich pozorování se používá speciální rastrovací elektronový mikroskop. Elektronový mikroskop je obdobou optického mikroskopu, kde jsou však fotony nahrazeny elektrony, a optické čočky elektromagnetickými čočkami, čímž je vytvořeno vhodně tvarované magnetické pole. Preparát se upravuje naprášením tenké vrstvy zlata. Využívá se toho, že vlnové délky urychlených elektronů jsou o mnoho řádů menší než fotonů viditelného světla. Proto má elektronový mikroskop mnohem vyšší rozlišovací schopnost a může tak dosáhnout mnohem vyššího zvětšení. Od každé plošné hmotnosti bylo náhodně odebráno 5 vzorků pro zhotovení snímků. Na každém snímku pak bylo provedeno 5 měření. Snímky struktury řezu nanovlákněných vrstev byly zhotoveny se zvětšením 5000, 6000, 7000,

8000, 10000 a 15000. Tyto snímky byly dále zpracovány pomocí obrazové analýzy Lucia G (viz obr. 37).

Lucia G je softwarový systém pro analýzu obrazu. Systém pracuje v prostředí Windows. Používá se pro měření tvarů, vzdáleností, ploch apod. Měření začíná kalibrací systému. Kalibrace přiřazuje objektům jejich reálný rozměr. Pro každé měření je potřeba vytvořit aktuální kalibraci, která odpovídá reálnému zvětšení. Výběrem vhodných polí se definuje prostor, ve kterém budou provedeny výpočty základních statistických veličin. Na softwaru Lucia byla měřena tloušťka metodou rovnoběžek v počtu 5 měření na každém snímku. Byly porovnávány změny tloušťky nanovrstvy s měnící se plošnou hmotností. Z naměřených hodnot byly vypočteny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.

**Tabulka 6: Průměrné tloušťky nanovláknenných vrstev.**

Plošná hmotnost [ $\text{g.m}^{-2}$ ]	5,7	2,6	2,2	1,7
Průměrná tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]	24,361	12,457	10,978	6,780
Směrodatná odchylka [ $\mu\text{m}$ ]	5,106	6,649	3,179	2,176



**Obrázek 37: Na snímku struktury řezu nanovláknenné vrstvy nasnímané pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu je znázorněno měření tloušťky pomocí OAL.**

**Snímek přísluší první nejvyšší plošné hmotnosti  $5,7 \text{ g.m}^{-2}$**



## 3.6 Parametry vzorků

### 3.6.1.1 Značení vzorků různé plošné hmotnosti:

(uvedeno za písmenem)

„1“ → vlákenná vrstva vyrobená při frekvenci 3 Hz (odpovídající rychlosti přibližně 0,04 m/min), → odpovídá průměrné plošné hmotnosti  $5,7 \text{ g.m}^{-2}$

„2“ → vlákenná vrstva vyrobená při frekvenci 6 Hz (odpovídající rychlosti přibližně 0,09 m/min) → odpovídá průměrné plošné hmotnosti  $2,6 \text{ g.m}^{-2}$

„3“ → vlákenná vrstva vyrobená při frekvenci 9 Hz (odpovídající rychlosti přibližně 0,14 m/min) → odpovídá průměrné plošné hmotnosti  $2,2 \text{ g.m}^{-2}$

„4“ → vlákenná vrstva vyrobená při frekvenci 12 Hz (odpovídající rychlosti přibližně 0,18 m/min) → odpovídá průměrné plošné hmotnosti  $1,7 \text{ g.m}^{-2}$

### 3.6.1.2 Označování různých velikostí ok mříže:

(uvedeno před písmenem)

„1M“ → nejmenší velikost ok, rozměr oka  $4,1 \times 4,3 \text{ mm}$  → odpovídá ploše  $17,63 \text{ mm}^2$

„2M“ → druhá velikost ok, rozměr oka  $9,4 \times 4,1 \text{ mm}$  → odpovídá ploše  $38,54 \text{ mm}^2$

„3M“ → třetí velikost ok, rozměr oka  $9,0 \times 9,4 \text{ mm}$  → odpovídá ploše  $84,60 \text{ mm}^2$

„4M“ → největší velikost ok, rozměr oka  $9,0 \times 14,2 \text{ mm}$  → odpovídá ploše  $127,80 \text{ mm}^2$

### 3.6.1.3 Označování různých tloušťek papíru:

(uvedeno před písmenem)

„1P“ → jedna vrstva kladívkového papíru

„2P“ → dvě vrstvy kladívkového papíru

„4P“ → čtyři vrstvy kladívkového papíru

### 3.6.1.4 Vzdálenost od odrazivé stěny:

Vzdálenost od odrazivé stěny je konstantní → 30 mm (ve značení se proto neobjevuje)

### 3.6.1.5 Značení vzorků v jednotlivých sadách:

„A“ → první vzorek z celkového počtu 5ti kusů proměřovaných vzorků

„B“ → druhý vzorek z celkového počtu 5 ti kusů proměřovaných vzorků

„C“ → třetí vzorek z celkového počtu 5 ti kusů proměřovaných vzorků

„D“ → čtvrtý vzorek z celkového počtu 5 ti kusů proměřovaných vzorků

„E“ → pátý vzorek z celkového počtu 5 ti kusů proměřovaných vzorků

### 3.6.1.6 Značení samotného papírového mezikruží a mřížky

„**1P**“...jedna vrstva papírového mezikruží bez nanovrstvy

„**2P**“...dvě vrstvy papírových mezikruží bez nanovrstvy

„**4P**“...čtyři vrstvy papírových mezikruží bez nanovrstvy

„**1M**“...nejmenší velikost ok mřížky bez nanovrstvy

„**2M**“...druhá nejmenší velikost ok mřížky bez nanovrstvy

„**3M**“...třetí velikost ok mřížky bez nanovrstvy

„**4M**“...největší velikost ok mřížky bez nanovrstvy

#### Příklad:

první velikost mřížky (nejmenší) → **1M1** ← první plošná hmotnost (nejvyšší 5,7 g.m<sup>-2</sup>)

↑

*mřížka*

„**1M1A**“...absorpční člen – nanovláknenná vrstva zvlákněná na mřížku s nejmenší velikostí ok, oka mají rozměr 4,1×4,3 mm – vláknenná vrstva je vyrobená při frekvenci 3 Hz → odpovídá průměrné plošné hmotnosti 5,7 g.m<sup>-2</sup> – vzdálenost nanovrstvy od odrazivé stěny 30 mm – první vzorek z celkového počtu 5 kusů proměřovaných vzorků.

„**4M3B**“...absorpční člen – nanovláknenná vrstva zvlákněná na mřížku s největší (čtvrtou) velikostí ok, oka mají rozměr 9,0×14,2 mm – vláknenná vrstva je vyrobená při frekvenci 9 Hz → odpovídá průměrné plošné hmotnosti 2,2 g.m<sup>-2</sup> – vzdálenost nanovrstvy od odrazivé stěny 30 mm – druhý vzorek z celkového počtu 5 kusů proměřovaných vzorků.

jedna vrstva papírového mezikruží → **1P1** ← první plošná hmotnost (nejvyšší 5,7 g.m<sup>-2</sup>)

↑

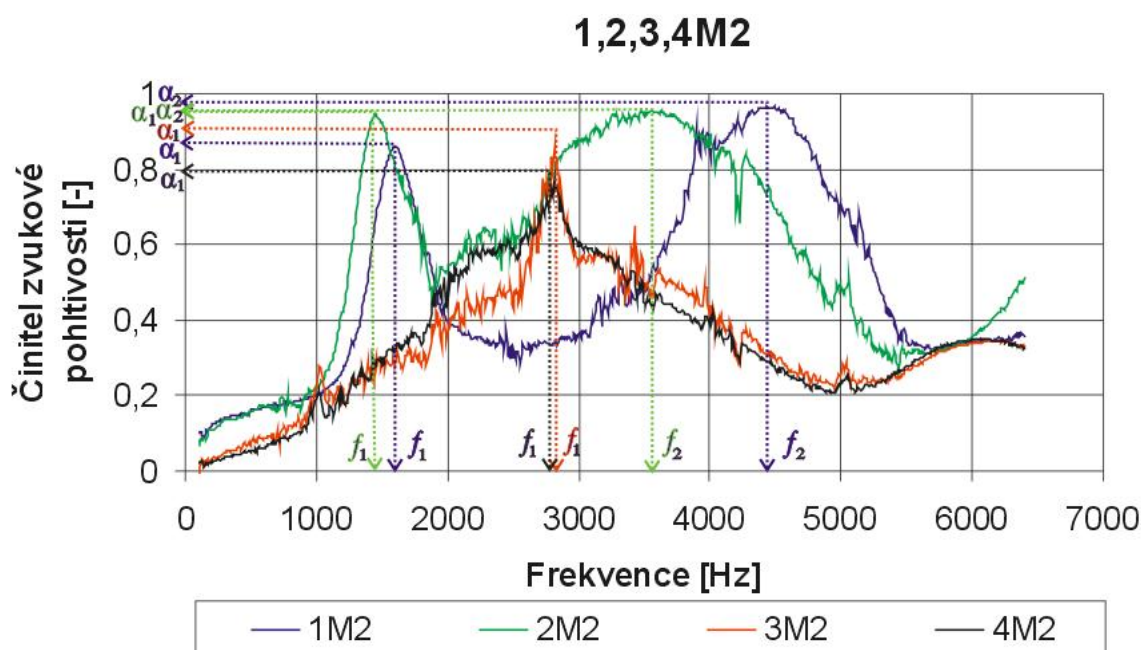
*papírové mezikruží*

„**4P1C**“...absorpční člen – nanovláknenná vrstva zvlákněná na čtyři vrstvy papírových mezikruží, odpovídající průměrně tloušťce 1,174 mm – vláknenná vrstva je vyrobená při frekvenci 3 Hz → odpovídá průměrné pl. hmotnosti 5,7 g.m<sup>-2</sup> – vzdálenost nanovrstvy od odrazivé stěny 30 mm – třetí vzorek z celkového počtu 5 kusů proměřovaných vzorků.

### 3.7 Vyhodnocování grafů

Pro větší přehlednost a jasné srovnání naměřených hodnot činitele zvukové pohltivosti byly tyto zpracovány v programu Excel do grafů. Z nich byla následně odečítána maxima činitele zvukové pohltivosti a jim odpovídající frekvence. Tato maxima se v grafech projevují v podobě vrcholů.

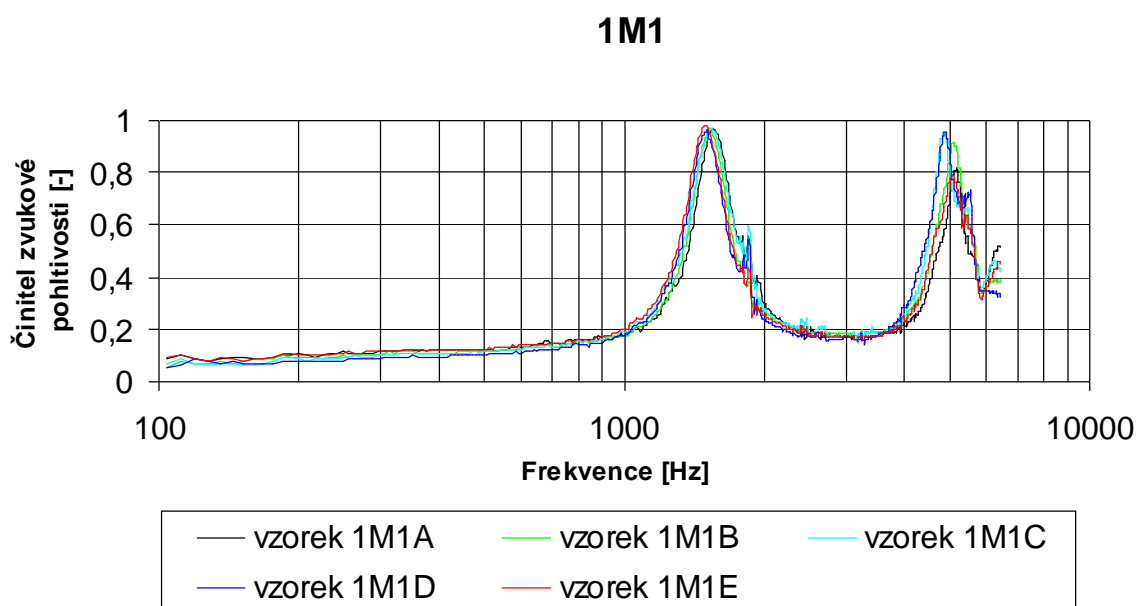
Příklad jejich odečtu je patrný z obr. 38, kde je znázorněn graf vzorků čtyř velikostí mřížek při druhé plošné hmotnosti nanovrstvy. Stejným způsobem bylo postupováno i u všech ostatních vzorků. Jednotlivé údaje byly zpracovány do tabulek 7 až 10 a 11 až 13.



Obrázek 38: Příklad odečítání maximálních hodnot činitele zvukové pohltivosti a příslušných frekvencí.

### 3.8 Statistické vyhodnocení

Činitel zvukové pohltivosti byl proměřen vždy na 5ti vzorcích se shodnými parametry (obr. 39), aby bylo možno statisticky vyloučit případné chyby a odchylky jednotlivých vzorků, a nahradit je aritmetickým průměrem. Dále pak byly vynášeny do grafů již jen tyto průměrné hodnoty každého typu vzorků a porovnávány mezi sebou. Křivky odpovídající stejným plošným hmotnostem se chovají velmi podobně (viz. Příloha 7 až 10).



**Obrázek 39: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci získaný při měření nanovlákněné vrstvy 1. plošné hmotnosti ( $5,7 \text{ g.m}^{-2}$ ), zvlákněné na mřížku s 1. velikostí ok, proměřováno na 5ti vzorcích.**

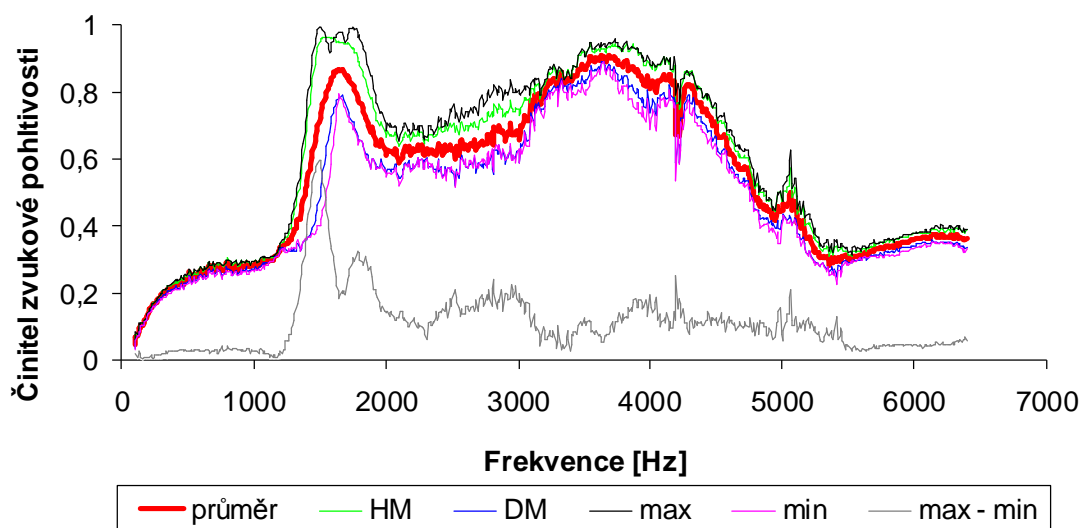
Při měření na dvou mikrofonové impedanční trubici lze získat poměrně přesné výsledky. Experimentálně byl testován vliv uložení vzorku v měřícím zařízení na velikost vzniklé chyby měření. Tímto problémem se mimo jiné zabývala ve své diplomové práci Lucie Dlábková [56].

Dále byl testován vliv nestejnoměrnosti materiálu na chybu měření. Výsledky vyplývající z měření ukazují, že manipulace se vzorkem a jeho struktura má vliv na naměřená data. Stejně tak je to s chybou měření přístroje, který pro stejný vzorek několikanásobně měřený vyhodnotí vždy rozdílná data.

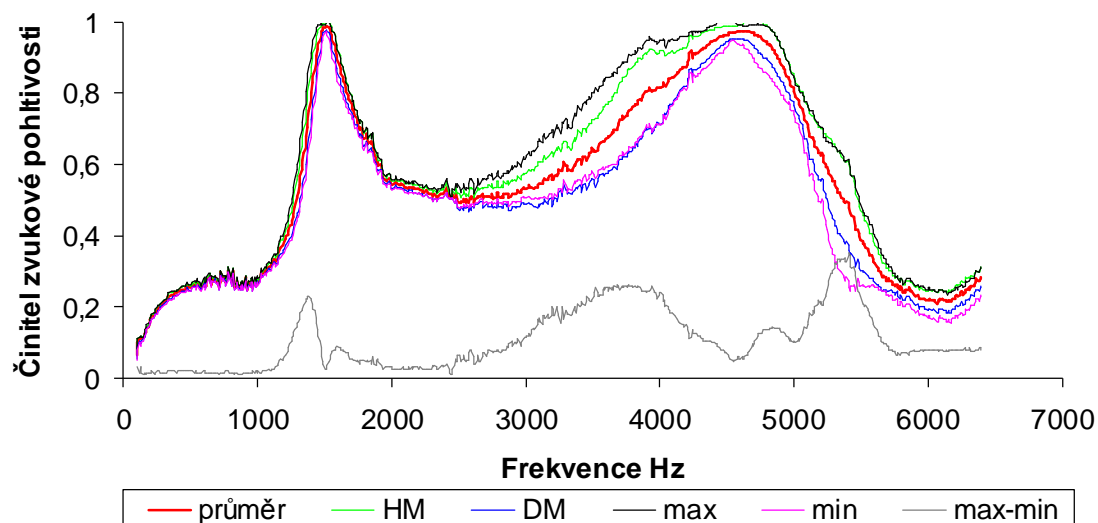
Odchylka těchto získaných hodnot je pro měřítko, ve kterém se s přístrojem pracuje (především pro porovnávání odlišných struktur materiálu), natolik malá a nevýznamná, že ji lze zanedbat.

Pro určení chyby přístroje byl použit jeden vzorek 1M4D, na němž bylo měření 5× zopakováno (viz obr. 42). Dalšímu hodnocení byl podroben vliv materiálu, tedy do jaké míry se projeví vliv vzorků z různých míst téže vlákenné vrstvy na hodnoty činitele zvukové pohltivosti. Pro tento případ byly použity vzorky 1M4A, 1M4B, 1M4C, 1M4D, 1M4E. Takto získané hodnoty činitele zvukové pohltivosti byly podrobeny statistickému vyhodnocení (viz obr. 40). Při testování vlivu uložení vzorku v měřicím zařízení na velikost vzniklé chyby měření byl použit vzorek 1M4D, který byl do trubice opětovně vkládán a to v celkovém počtu 5ti měření (viz obr. 41).

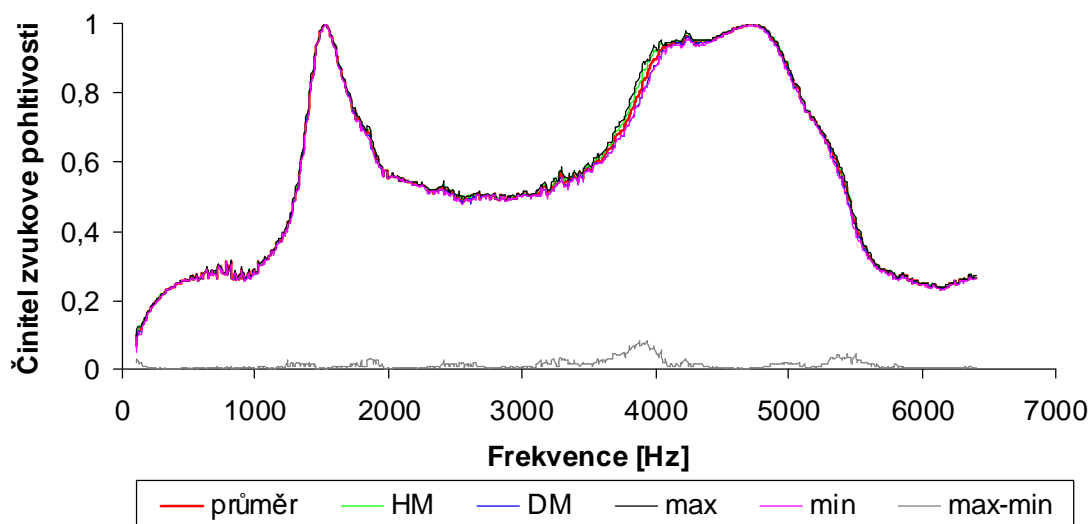
V grafech je znázorněna průměrná hodnota, 95% interval spolehlivosti, který je prezentován horní a dolní mezí (v grafu značeny HM a DM) a křivka znázorňující rozdíl mezi maximem a minimem.



**Obrázek 40:** Statistické vyhodnocení změny činitele zvukové pohltivosti pro vzorky 1M4A, 1M4B, 1M4C, 1M4D a 1M4E z různých míst téže vlákenné vrstvy - chyba nestejnoměrnosti materiálu.



**Obrázek 41: Statistické vyhodnocení změny činitele zvukové pohltivosti pro 5× opakované měření při různém uložení vzorku 1M4D - chyba uložení (+ chyba přístroje).**



**Obrázek 42: Statistické vyhodnocení změny činitele zvukové pohltivosti pro 5× opakované měření při jednom konstantním uložení na vzorku 1M4D - chyba přístroje.**

## 4. Diskuse

Měření bylo prováděno na vzorcích, zhotovených elektrostatickým zvlákněním nanovlákněné vrstvy na mřížky ze skleněných vláken a na papírová mezikruží. Membrána, tvořená nanovlákněnou vrstvou, byla ve všech případech umístěna v konstantní vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny. Křivky v následujících grafech ukazují naměřenou závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci.

Byl zkoumán vliv velikosti ok mřížky na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci. Z grafů obr. 43 až 46 je patrné, že křivky vytvářejí v případě 1. a 2. velikosti ok (1M1,2,3,4 a 2M1,2,3,4) dvě maxima, v případě 3. velikosti ok (3M1,2,3,4) lze hovořit pouze o určitém mírném náznaku prvního ze dvou maxim, zatímco v případě 4. velikosti ok (4M1,2,3,4) je zřetelné jen jedno maximum, přičemž v celém průběhu všechny křivky stále kmitají. Z grafů je též vidět, že nanovlákněná vrstva nanosená na menší oka lépe tlumí frekvence v oblasti přibližně 1500 Hz a od 4000 do 5000 Hz, zatímco nanovlákněná vrstva nanosená na větší oka lépe tlumí frekvence od 2500 do 3000 Hz. Je tedy zřejmé, že velikost ok skleněné mřížky má na velikost činitele zvukové pohltivosti zásadní vliv. Kontrolním měřením samotných mřížek byly zjištěny téměř totožné průběhy křivek všech velikostí ok, s jen minimálními hodnotami činitele zvukové pohltivosti. Lze tedy říci, že samotná nosná mřížka nijak zásadně průběhy křivek zvukové pohltivosti neovlivňuje.

Při zkoumání vlivu různé plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy zvlákněné na mřížku se stejnou velikostí ok lze z grafů obr. 48 až 51 vysledovat trend, kdy se stoupající plošnou hmotností je patrný posun maxim křivek k nižším frekvencím (nejvyšší plošná hmotnost 1M1 a nejnižší 1M4). S rostoucí plošnou hmotností křivky rostou rychleji a dosahují vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti.

V dalším měření byl zkoumán vliv různé tloušťky papírového mezikruží na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci. Z grafů křivek průběhů zvukové pohltivosti nanovlákněné vrstvy zvlákněné na papírových mezikruzích o různých tloušťkách však jednoznačné vrcholy vyčíst nelze, oproti nanovrstvě zvlákněné na mřížky s různou velikostí ok, dosahují pouze určitých maximálních hodnot, relativně nízkých a nevýrazných. Jedno z možných vysvětlení tohoto jevu by mohlo spočívat v nedostatečné napjatosti nanovlákněné vrstvy na mezikruzích. Další možností vysvětlení tohoto jevu by mohlo být v tom, že kmitavý pohyb nanovlákněných membrán, který je základním principem pohlcování zvuku, je

okamžitě utlumen ve struktuře papírových mezikruží, na což by ukazovaly i předběžné experimenty s různými materiály mezikruží. Kontrolním měřením samotných papírových mezikruží byly zjištěny téměř totožné průběhy křivek. Lze tak říci, že tloušťka papíru nijak znatelně průběhy křivek zvukové pohltivosti neovlivňuje.

Při zkoumání vlivu různé plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy zvlákněné na papírová mezikruží stejné tloušťky z grafů obr. 57 až 59, nelze jednoznačně konstatovat vliv plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti. Lze pouze předpokládat, že se snižující se plošnou hmotností nanovlákněné vrstvy je dosahováno nižších hodnot činitele zvukové pohltivosti.

Na mezikruží lze pohlížet jako na mřížku s maximální velikostí ok. Aby mohly být porovnány stejné nebo alespoň co nejvíce se k sobě blíží tloušťky mřížové tkaniny a papírového mezikruží, byly u všech vzorků změřeny jejich tloušťky, a na základě těchto výsledků byla k porovnávání s mřížemi zvolena papírová mezikruží složená ze dvou vrstev papíru. Porovnání vzorků nanovlákněné vrstvy stejné plošné hmotnosti zvlákněné na mřížky a mezikruží je znázorněno na obr. 60 až 63. U první plošné hmotnosti nanovrstvy zvlákněné na mezikruží 2. tloušťky (viz tab. 16 až 17), je jasně viditelné pokračování trendu tvaru křivek, který je patrný u třetí a čtvrté velikosti ok mřížové tkaniny, v podobě jednoho maxima v oblasti přibližně 2800 Hz. V případě ostatních plošných hmotností se však tato charakteristika již nijak zřetelně neprojevuje. Zdůvodnění pro tyto jevy lze nejpravděpodobněji hledat ve slabších nanovrstvách, již ne tak účinných v pohlcování zvuku, jako je nanovrstva nejvyšší plošné hmotnosti, vykazující nejlepší výsledky.

Do tabulek 7 až 10 a 11 až 13 byly zpracovány maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti a jim odpovídající frekvence, odečtené z grafů.

U všech grafů všech měření se v oblasti frekvencí nad 5500 Hz objevují téměř shodné průběhy křivek, v podobě mírného zvlnění, což lze vysvětlit vlivem geometrie samotné impedanční trubice.



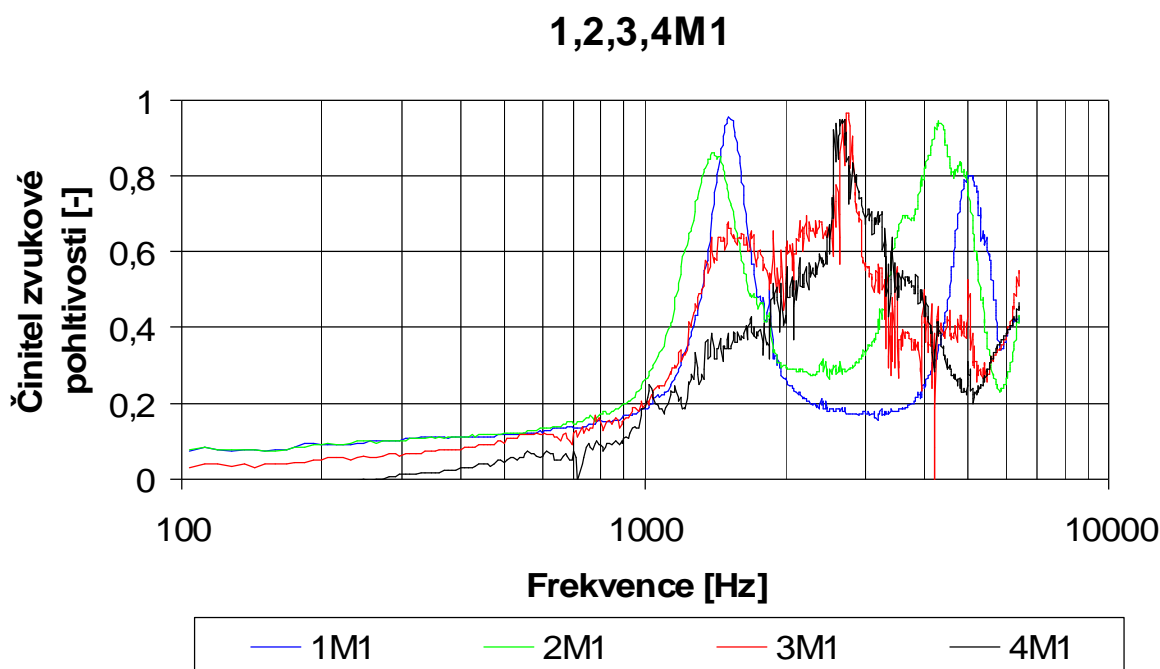
## 4.1 Vliv velikosti ok mřížky

V tomto měření byl zkoumán vliv velikosti ok mřížky na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci. Byla zkoumána nanovláknenná vrstva vždy o stejné plošné hmotnosti, ale s různými velikostmi ok mřížky. Z grafů obr. 43 až 46 je patrné, že křivky vytvářejí v případě 1. a 2. velikosti ok (1M<sub>1,2,3,4</sub> a 2M<sub>1,2,3,4</sub>) dvě maxima, v případě 3. velikosti ok (3M<sub>1,2,3,4</sub>) lze hovořit pouze o určitém velmi malém náznaku prvního ze dvou maxim, zatímco v případě 4. velikosti ok (4M<sub>1,2,3,4</sub>) je zřetelné jen jedno maximum, přičemž v celém průběhu všechny křivky stále kmitají.

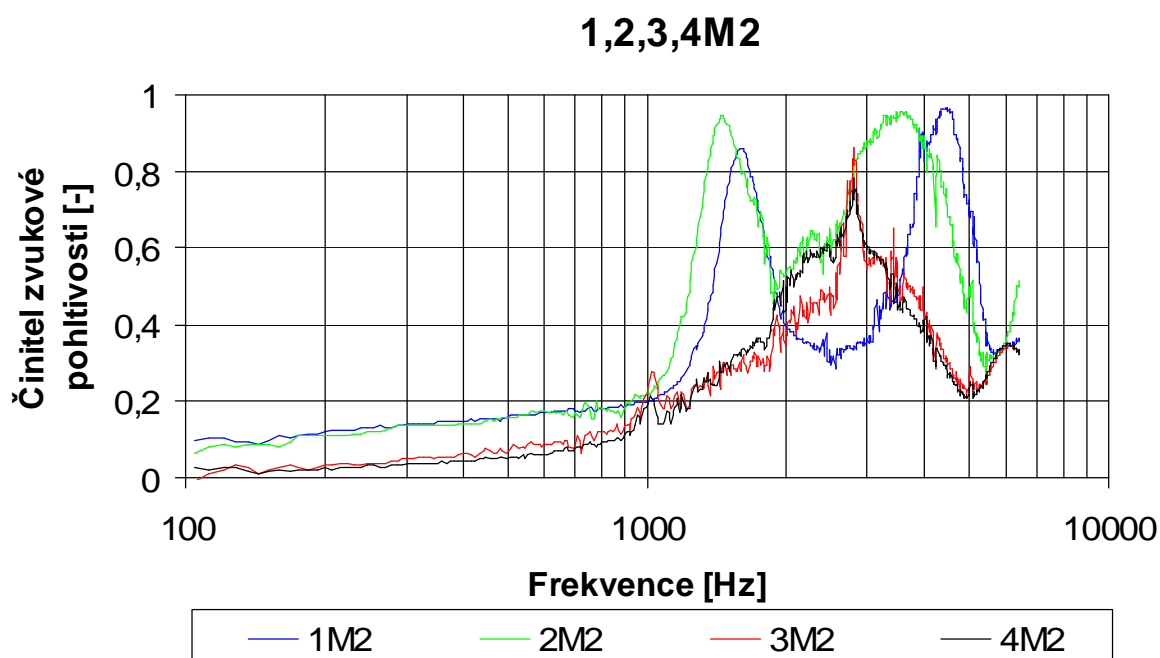
Z grafů je též vidět, že nanovláknenná vrstva, nanesená na menší oka, lépe tlumí frekvence v oblasti přibližně 1500 Hz a od 4000 do 5000 Hz, zatímco nanovláknenná vrstva nanesená na větší oka lépe tlumí frekvence od 2500 do 3000 Hz. Dosažení maxim křivek 1. a 2. velikosti ok v blízkosti sebe ležících frekvencích si lze vysvětlit nejspíše tím, že oka 1. a 2. velikosti mají stejnou šířku 4,1 mm, která je poměrně malá, a tím dovoluje jen malý rozkmit nanovrstvy, bez ohledu na celkovou plochu oka. Současně lze vysledovat, že maxima dosahuje při nižších frekvencích vždy křivka pro druhou velikost ok, což si lze vysvětlit dosti velkým procentuálním rozdílem ploch ok 1. a 2. velikosti, kde jejich poměr činí více než 1:2. To umožňuje přece jen větší rozkmit nanovrstvy v oku 2. velikosti než je tomu v oku 1. velikosti. S tím kontrastují maxima křivek 2. a 3. velikosti ok, neboť i když oka mají stejnou výšku 9,4 mm, tak nelze hovořit o stejném, nebo alespoň podobném průběhu maxim. Naproti tomu mají křivky 3. a 4. velikosti ok maxima vždy v přibližně totožných frekvencích, což lze též vysvětlit shodnou šířkou obou velikostí ok (9 mm), avšak absenci rozdílu v pravidelnosti odchýlení obou maxim lze vysvětlit tím, že zde již není tak znatelný rozdíl ploch obou ok, jako je tomu v případě ok 1. a 2. velikosti.

Z dříve uvedených vztahů (14), (15) a (16) je zřejmé, že poloměr membrány je nepřímo úměrný frekvenci, a se zvyšujícím se poloměrem membrány se frekvence kmitů bude snižovat, což se v našem případě potvrdilo pouze u 1. a 2. velikosti ok, kdy oko s větší plochou kmitá při nižších frekvencích. U 3. a 4. velikosti ok toto nepozorujeme, a domníváme se, že zde došlo ke zkreslení vlivem příliš malé velikosti vzorku vůči velikosti ok, kdy vzorek obsahuje průměrně 25 celých ok 1. velikosti, 10 celých ok 2. velikosti, ale již pouze 4 celá oka 3. velikosti, respektive jen 2 celá oka u 4. velikosti.

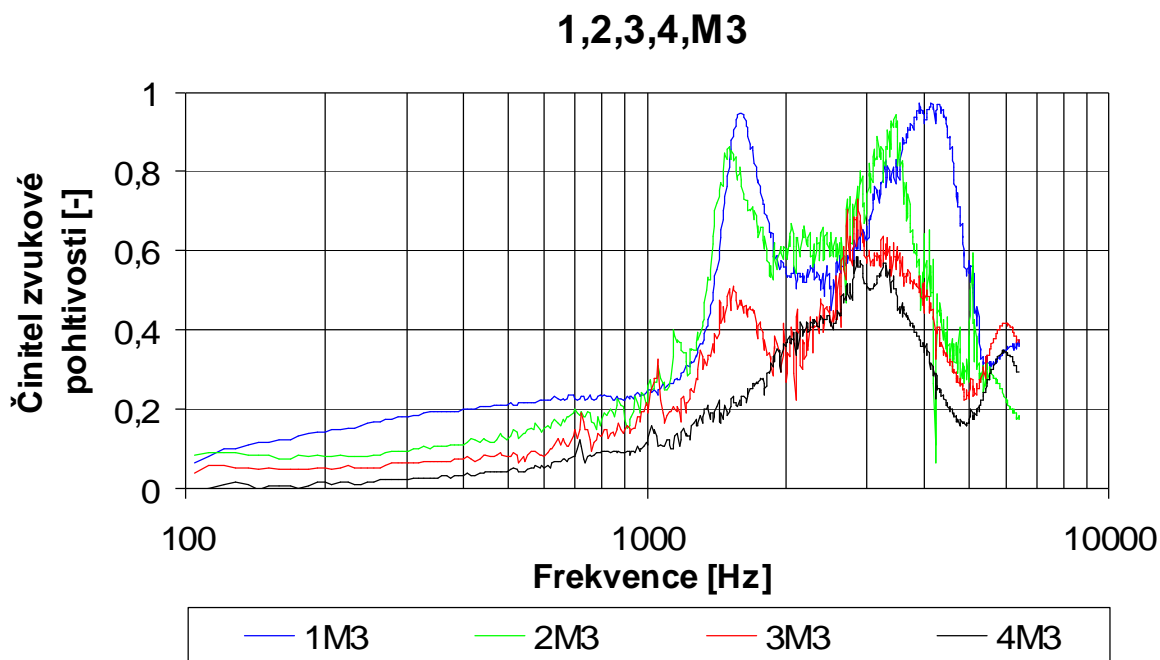
Z tohoto důvodu by bylo vhodné pro přesnější měření zhotovit vzorky vždy jen s jedním okem, požadované velikosti.



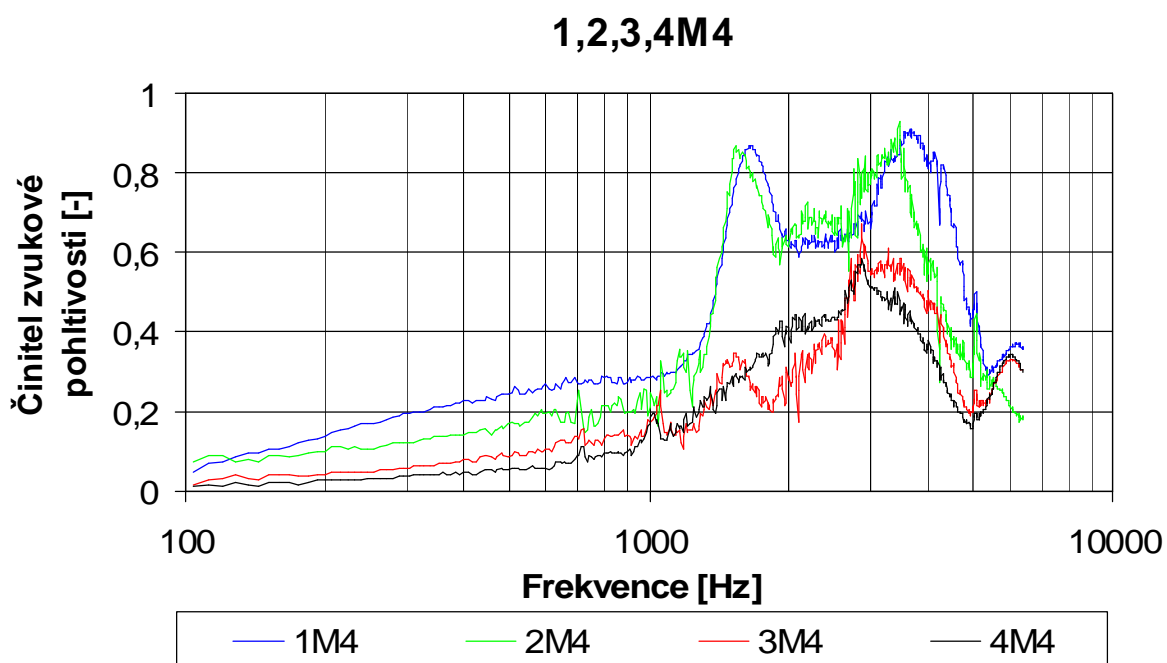
Obrázek 43: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření nanovláknenné vrstvy 1. plošné hmotnosti ( $5,7 \text{ g.m}^{-2}$ ), zvlákněné na mřížky s různou velikostí ok.



Obrázek 44: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření nanovláknenné vrstvy 2. plošné hmotnosti ( $2,5 \text{ g.m}^{-2}$ ), zvlákněné na mřížky s různou velikostí ok.

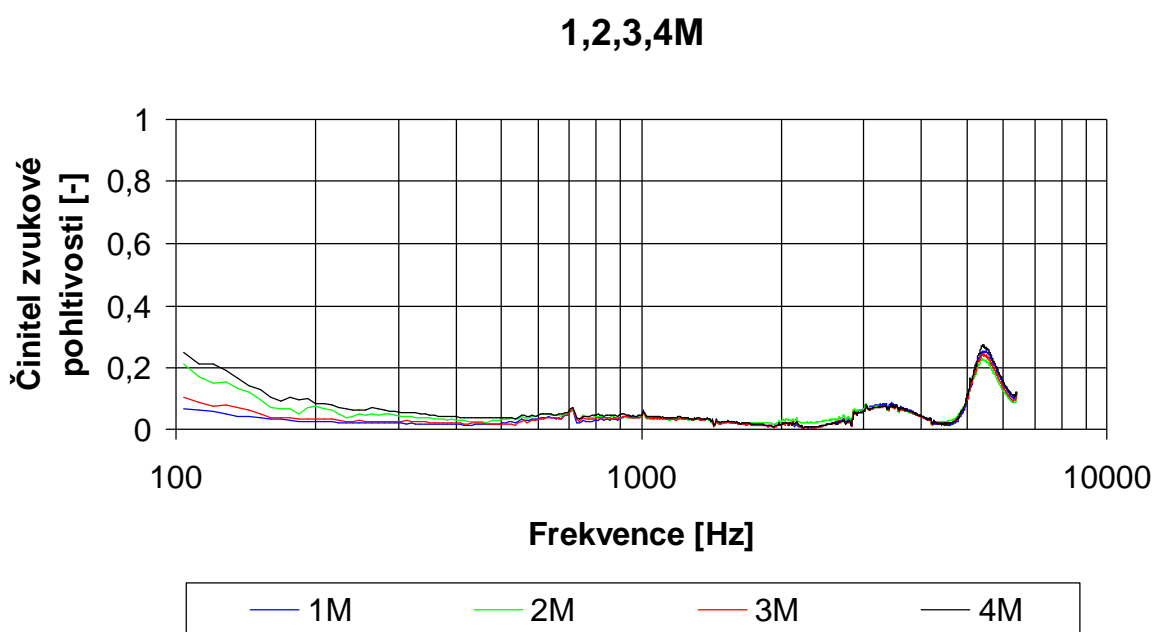


Obrázek 45: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření nanovláknenné vrstvy 3. plošné hmotnosti ( $2,2 \text{ g.m}^{-2}$ ), zvlákněné na mřížky s různou velikostí ok.



Obrázek 46: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření nanovláknenné vrstvy 4. plošné hmotnosti ( $1,7 \text{ g.m}^{-2}$ ), zvlákněné na mřížky s různou velikostí ok.

Kontrolním změřením samotných mřížek s různou velikostí ok byly zjištěny téměř totožné průběhy křivek. Lze tak říci, že samotné mřížky nijak zásadně průběhy křivek zvukové pohltivosti neovlivňují (viz obr. 47). V tab. 15 jsou uvedeny plošné hmotnosti mřížek s různou velikostí ok, měřené v impedanční trubici.

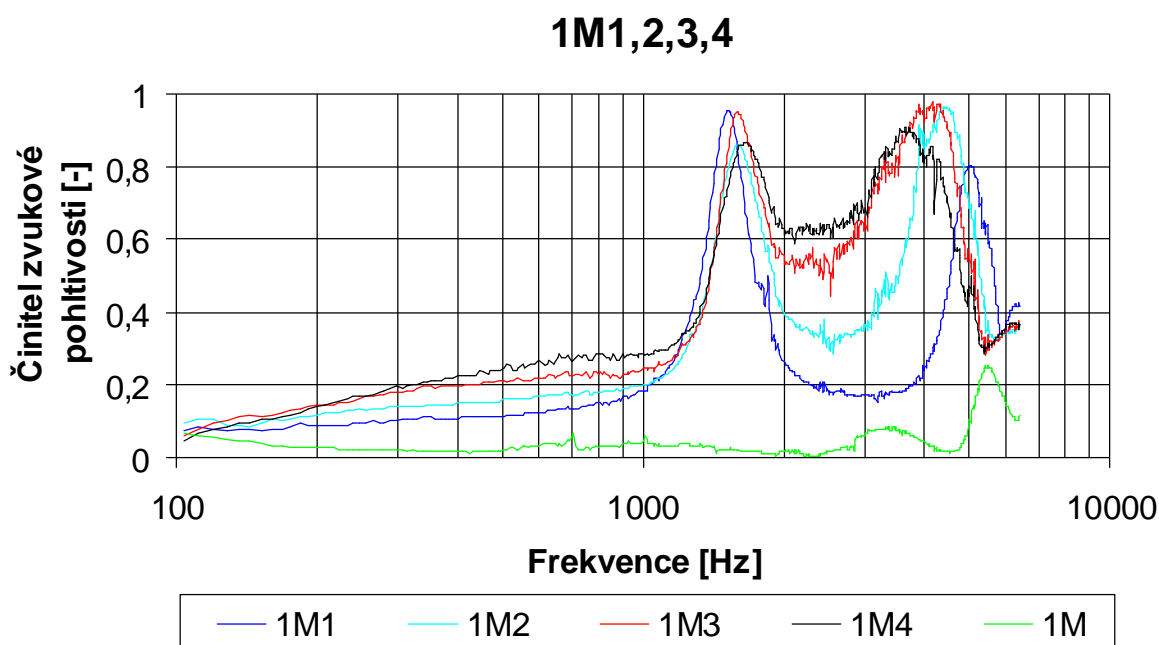


**Obrázek 47: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci při měření samotné mřížky s různou velikostí ok.**

U všech grafů všech měření se v oblasti frekvencí nad 5500 Hz objevují téměř shodné průběhy křivek, v podobě mírného zvlnění, což lze vysvětlit vlivem geometrie samotné impedanční trubice.

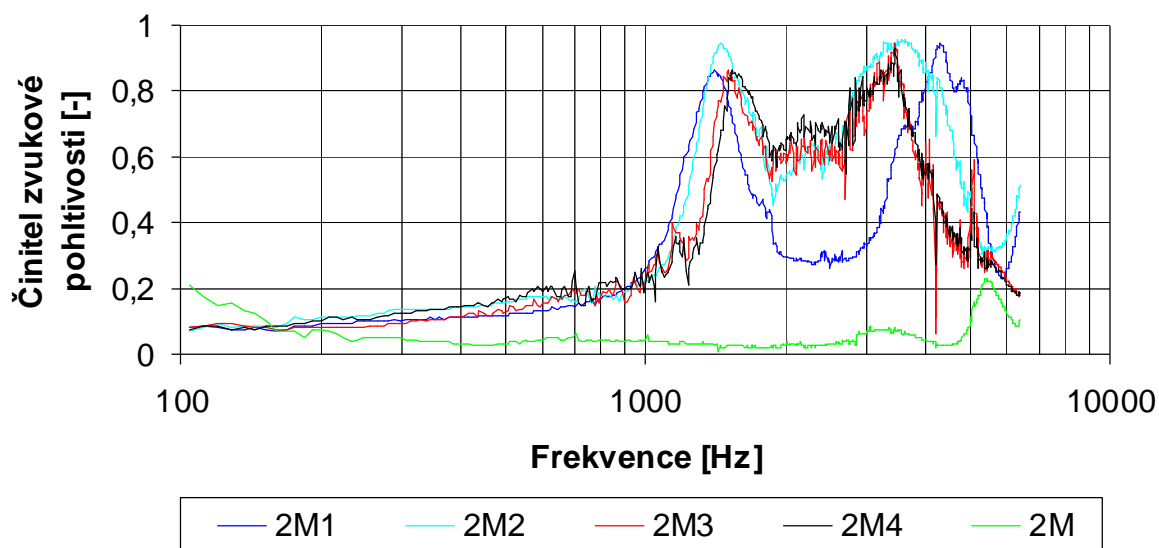
## 4.2 Vliv plošné hmotnosti nanovrstvy zvlákněné na mřížku

V tomto měření byl zkoumán vliv plošné hmotnosti nanovrstvy zvlákněné na mřížku se stejnou velikostí ok na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci. Byly zkoumány mřížky vždy se stejnou velikostí ok, ale s různou plošnou hmotností nanovrstvy. Následující obr. 48 až 51 popisují závislost činitele zvukové pohltivosti na měnící se frekvenci pro všechny plošné hmotnosti. Se stoupající plošnou hmotností je patrný posun maxim křivek k nižším frekvencím (nejvyšší plošná hmotnost 1M1 a nejnižší 1M4). S rostoucí plošnou hmotností křivky rostou rychleji a dosahují vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti. Tento trend není splněn u křivky odpovídající druhé plošné hmotnosti, kde se objevuje v oblasti od 1000 do 2000 Hz určité odchýlení, které mohlo být způsobeno manipulací se vzorky nebo nestejnoměrností vyrobené nanovlákněné vrstvy.



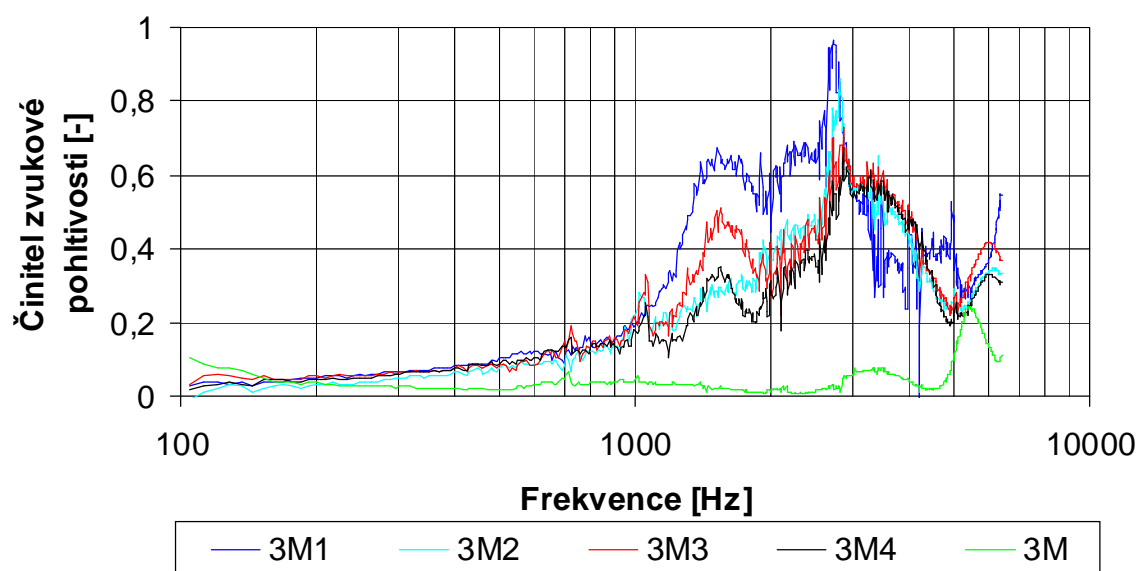
**Obrázek 48:** Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření mřížky s 1. velikostí ok se zvlákněnými nanovrstvami všech plošných hmotností a samotné mřížky.

### 2M1,2,3,4

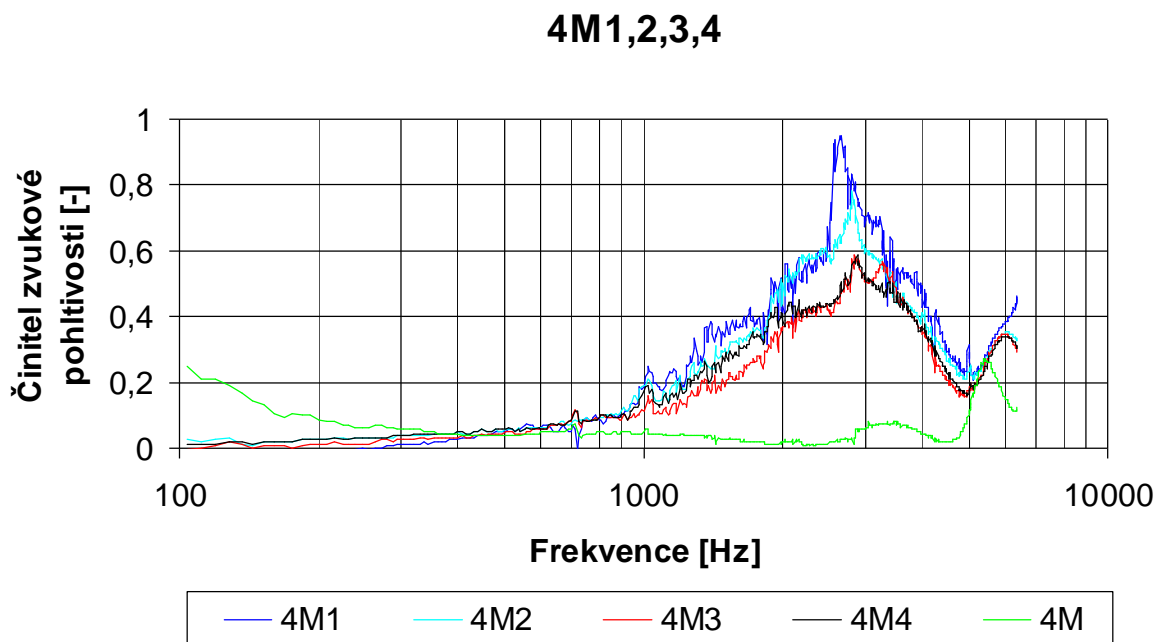


Obrázek 49: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření mřížky s 2. velikostí ok se zvlákněnými nanovrstvami všech plošných hmotností a samotné mřížky.

### 3M1,2,3,4



Obrázek 50: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření mřížky s 3. velikostí ok se zvlákněnými nanovrstvami všech plošných hmotností a samotné mřížky.



**Obrázek 51: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření mřížky s 4. velikostí ok se zvlákněnými nanovrstvami všech plošných hmotností a samotné mřížky.**

Do tabulek 7 až 10 byly zpracovány maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti a jim odpovídající frekvence, odečtené z grafů. Maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti byly odečítány pro všechny plošné hmotnosti. Závislost činitele zvukové pohltivosti na kmitočtu vykazuje dle [9] v rezonanci soustav vždy své maximum na vlastním kmitočtu soustavy, neboť množství zvukové energie, přeměněné v jinou energii, stoupá s velikostí amplitudy některé z akustických veličin (např. akustická rychlost), a ty mají v rezonanci své maximum. Lze tedy předpokládat, že maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti uvedené v tabulce 7 až 10 odpovídají rezonančním (vlastním) frekvencím.

**Tabulka 7: Maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti a jim odpovídající frekvence nanovláknenné vrstvy 1, 2, 3 a 4 plošné hmotnosti, zvlákněné na mřížku s 1. velikostí ok.**

1M1			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,858	1600		
0,801		5008	

1M2			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,858	1600		
0,966		4432	

1M3			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,95	1592		
0,974		3896	

1M4			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,867	1672		
0,906		3696	

**Tabulka 8: Maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti a jim odpovídající frekvence nanovláknenné vrstvy 1, 2, 3 a 4 plošné hmotnosti, zvlákněné na mřížku s 2. velikostí ok.**

2M1			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,944	1456		
0,941		4312	

2M2			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,943	1456		
0,958		3560	

2M3			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,95	1592		
0,943		3448	

2M4			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,867	1536		
0,934		3448	



**Tabulka 9: Maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti a jim odpovídající frekvence nanovláknenné vrstvy 1, 2, 3 a 4 plošné hmotnosti, zvlákněné na mřížku s 3. velikostí ok.**

3M1				3M2			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]	Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,677	1512			0,863	2816		
0,968		2728		0,651		3424	

3M3				3M4			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]	Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,51	1536			0,35	1536		
0,731		2872		0,674		2872	

**Tabulka 10: Maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti a jim odpovídající frekvence nanovláknenné vrstvy 1, 2, 3 a 4 plošné hmotnosti, zvlákněné na mřížku s 4. velikostí ok.**

4M1				4M2			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]	Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,95	2656			0,783	2816		

4M3				4M4			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]	Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,586	2840			0,586	2880		
0,57		3272		-		-	

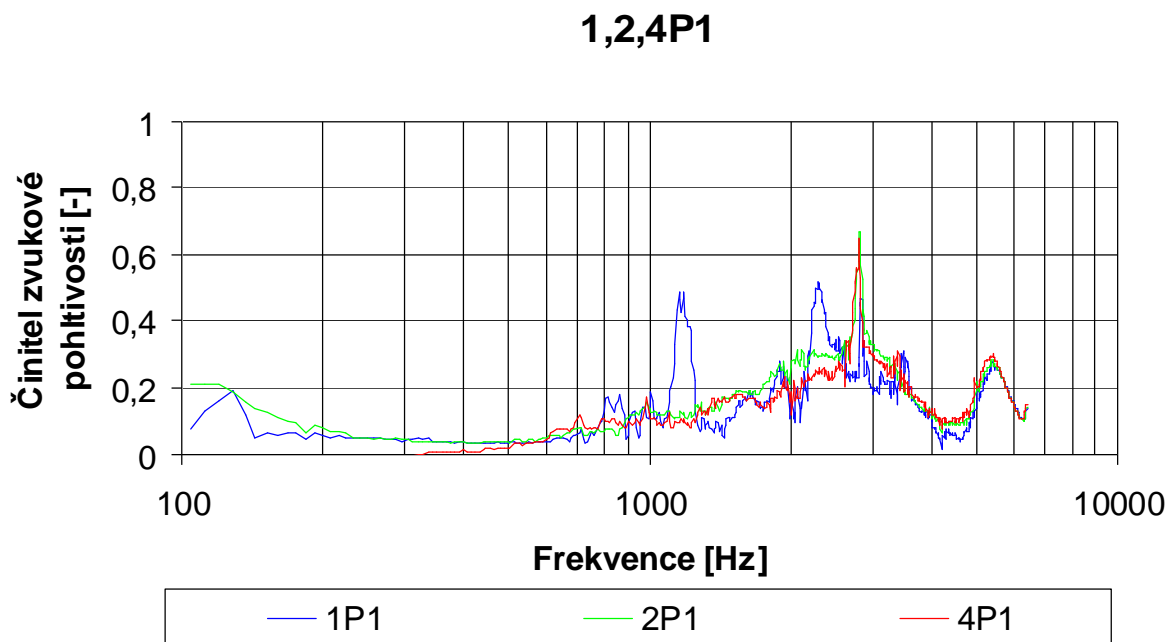
### 4.3 Vliv tloušťky papírového mezikruží

V tomto měření byl zkoumán vliv různé tloušťky papírového mezikruží na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci. Pro zjištění vlivu různé tloušťky mezikruží bylo po předběžných experimentech zvoleno mezikruží papírové. Papíry byly použity jednak v jedné základní vrstvě, a jednak byly dále vrstveny lepením, a to 2 ks a 4 ks na sebe.

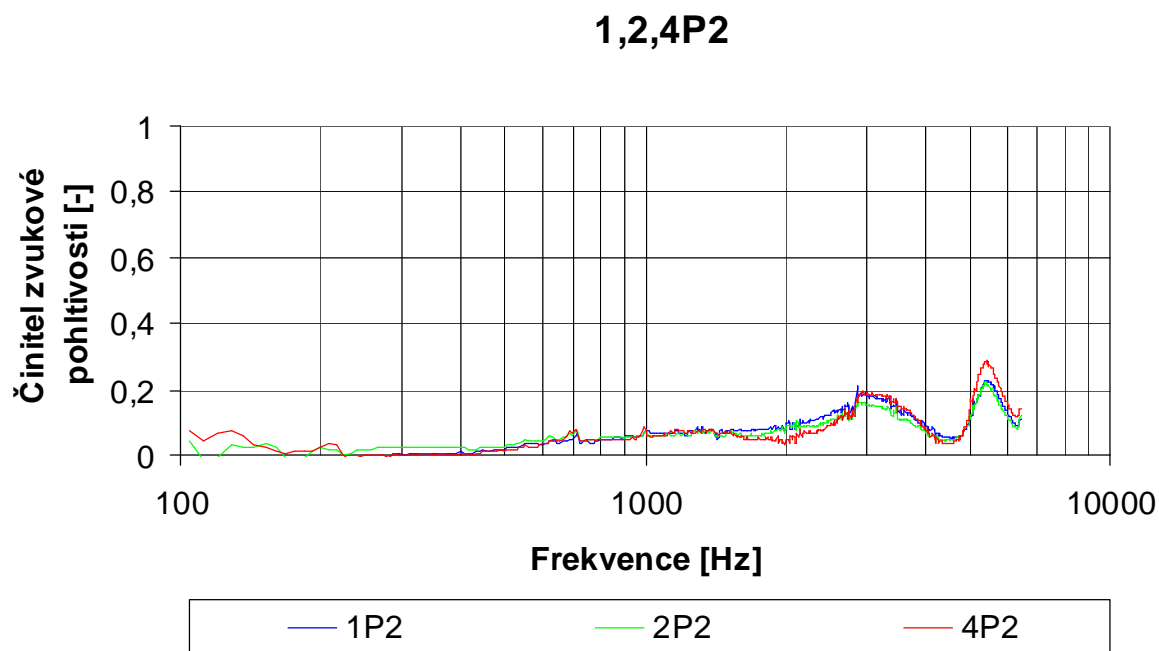
Z grafů křivek průběhů zvukové pohltivosti nanovlákněné vrstvy, zvlákněné na papírová mezikruží o různých tloušťkách, však jednoznačné vrcholy vyčíst nelze, dosahují pouze určitých maximálních hodnot, relativně nízkých a nevýrazných, oproti nanovrstvám zvlákněným na mřížky s různou velikostí ok (viz obr. 52 až 55). Nelze tak jednoznačně konstatovat vliv tloušťky mezikruží na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti. Lze pouze předpokládat, že tloušťka papírových mezikruží ovlivňuje určitým dílem chování celé soustavy, ale tato ovlivnění dosahují pouze minimálních hodnot.

Jedno z možných vysvětlení tohoto jevu by mohlo spočívat v nedostatečné napjatosti nanovlákněné vrstvy na mezikružích. Zvlákněním nanovlákněné vrstvy na papírová mezikruží bylo sice dosaženo konstantní napínací síly, ovšem příliš malé.

Další možností vysvětlení tohoto jevu by mohlo být v tom, že kmitavý pohyb nanovlákněných membrán, který je základním principem pohlcování zvuku, je okamžitě utlumen ve struktuře papírových mezikruží, na což by ukazovaly i předběžné experimenty s různými materiály mezikruží.

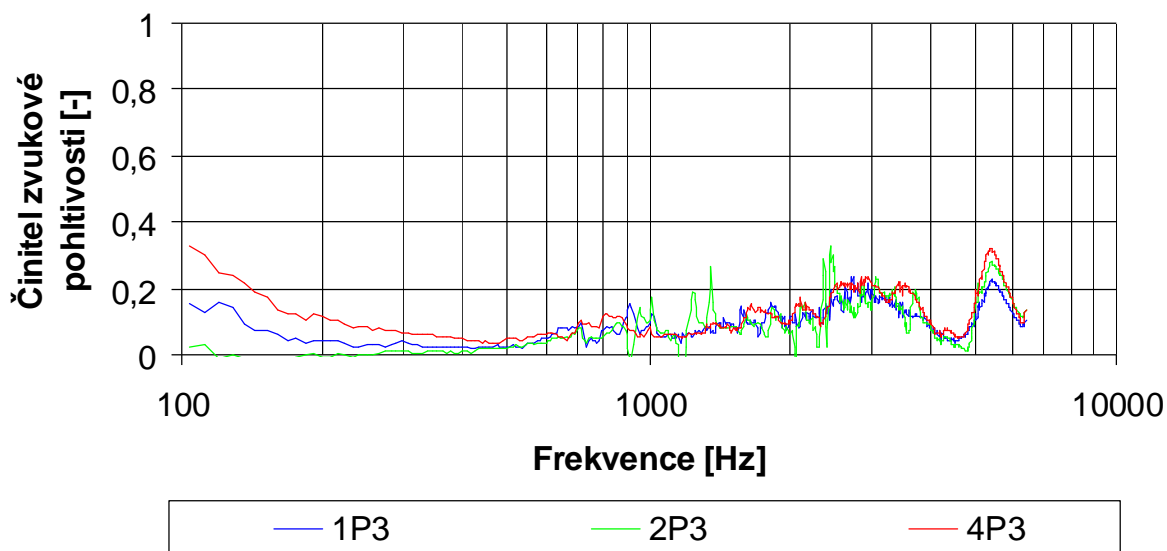


Obrázek 52: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření nanovláknenné vrstvy 1. plošné hmotnosti ( $5,7 \text{ g.m}^{-2}$ ), zvlákněné na papírová mezikruží s 1, 2 a 4 vrstvami.



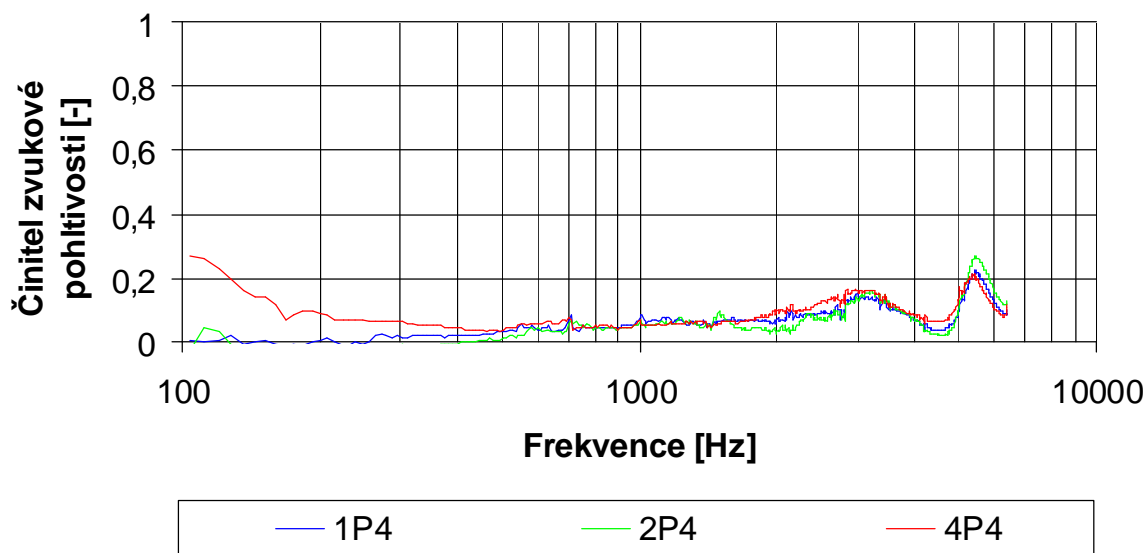
Obrázek 53: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření nanovláknenné vrstvy 2. plošné hmotnosti ( $2,5 \text{ g.m}^{-2}$ ), zvlákněné na papírová mezikruží s 1, 2 a 4 vrstvami.

### 1,2,4P3



Obrázek 54: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření nanovláknenné vrstvy 3. plošné hmotnosti ( $2,2 \text{ g.m}^{-2}$ ), zvlákněné na papírová mezikruží s 1, 2 a 4 vrstvami.

### 1,2,4P4

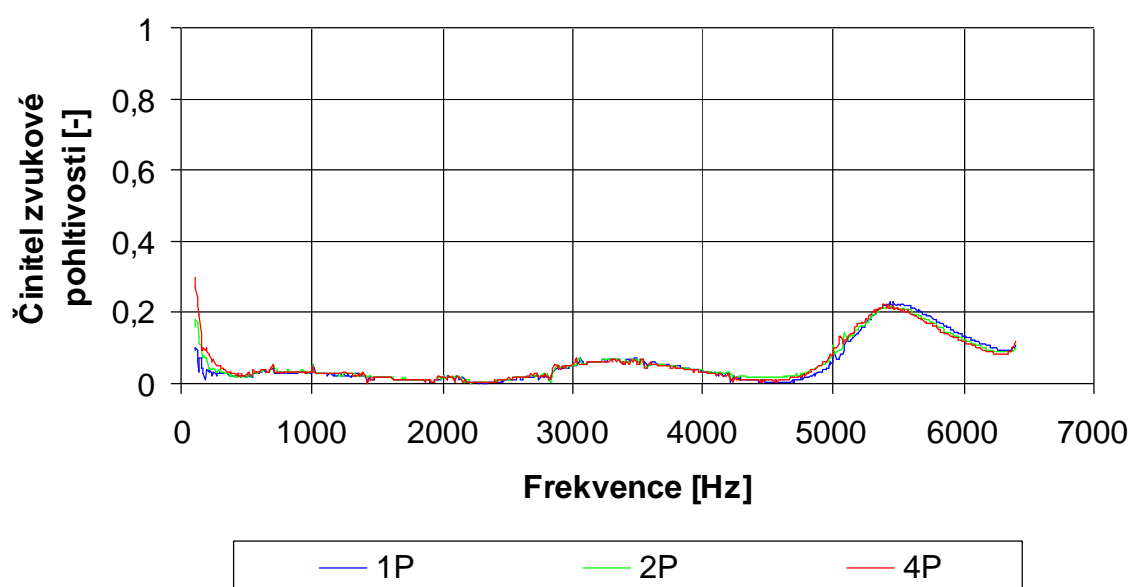


Obrázek 55: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření nanovláknenné vrstvy 4. plošné hmotnosti ( $1,7 \text{ g.m}^{-2}$ ), zvlákněné na papírová mezikruží s 1, 2 a 4 vrstvami.

Kontrolním měřením samotných papírových mezikruží o tloušťkách 1, 2 a 4, byly zjištěny téměř totožné průběhy křivek. To si lze vysvětlit tím, že samotná papírová mezikruží nijak zásadně průběhy křivek zvukové pohltivosti neovlivňují, nebo vzhledem k tomu, že je možné vypočítat stejný průběh křivek jak pro samotné papírové mezikruží (viz obr. 56), tak pro 2, 3 a 4 plošnou hmotnost, a tedy že kmitavý pohyb nanovláknenných membrán, který je základním principem pohlcování zvuku, je okamžitě utlumen ve struktuře papírových mezikruží, na což by ukazovaly i předběžné experimenty s různými materiály mezikruží.

Proto by bylo vhodné dále více prozkoumat schopnosti tlumení těchto i jiných dalších materiálů, použitých na výrobu mezikruží. V tab. 14 jsou uvedeny plošné hmotnosti papírových mezikruží různé tloušťky, měřené v impedanční trubici.

### 1,2,4P

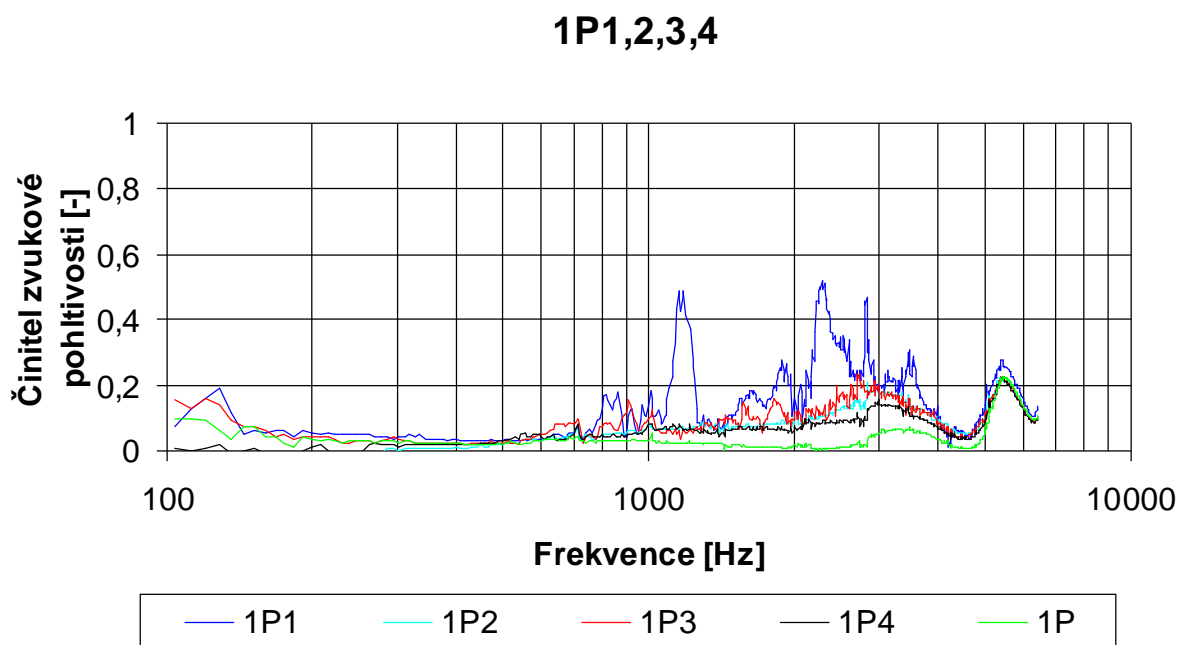


Obrázek 56: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření samotných papírových mezikruží s 1, 2 a 4 vrstvami.

U všech grafů všech měření se v oblasti frekvencí nad 5500 Hz objevují téměř shodné průběhy křivek, v podobě mírného zvlnění, což lze vysvětlit vlivem geometrie samotné impedanční trubice.

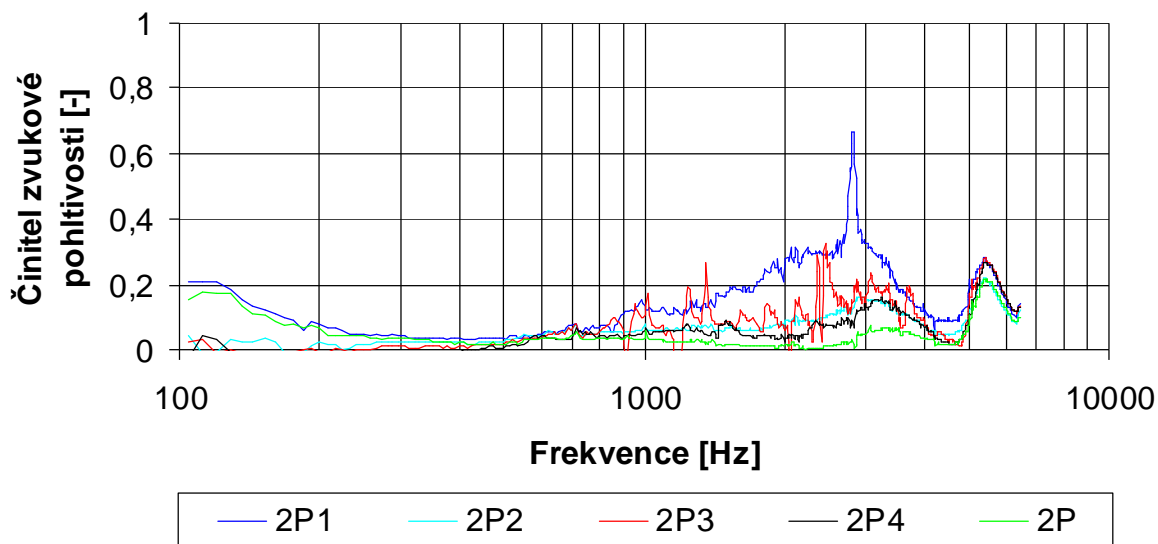
#### 4.4 Vliv plošné hmotnosti nanovrstvy zvlákněné na mezikruží

V tomto měření byl zkoumán vliv různé plošné hmotnosti nanovrstvy, zvlákněné na papírová mezikruží o stejné tloušťce, na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti na frekvenci. Byla zkoumána papírová mezikruží vždy se stejnou tloušťkou, ale s různou plošnou hmotností nanosené nanovlákněné vrstvy. Z grafu obr. 57 až 59 je patrné, že křivka příslušející první plošné hmotnosti, dosahuje oproti zbylým třem křivkám vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti bez ohledu na tloušťku použitého papírového mezikruží. Jako vysvětlení tohoto jevu se nabízí lepší absorpční schopnost nanovrstvy 1. největší plošné hmotnosti ( $5,7 \text{ g.m}^{-2}$ ). V případě třetí plošné hmotnosti nanovrstvy lze pozorovat neurčité kmitání v širokém pásmu od 1000 do 5000 Hz. Průběhy křivek odpovídající druhé a čtvrté plošné hmotnosti se pohybují ve velmi nízkých hodnotách činitele zvukové pohltivosti. Nelze jednoznačně konstatovat vliv plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti. Lze tak pouze předpokládat, že se snižující se plošnou hmotností nanovlákněné vrstvy je dosahováno nižších hodnot činitele zvukové pohltivosti.



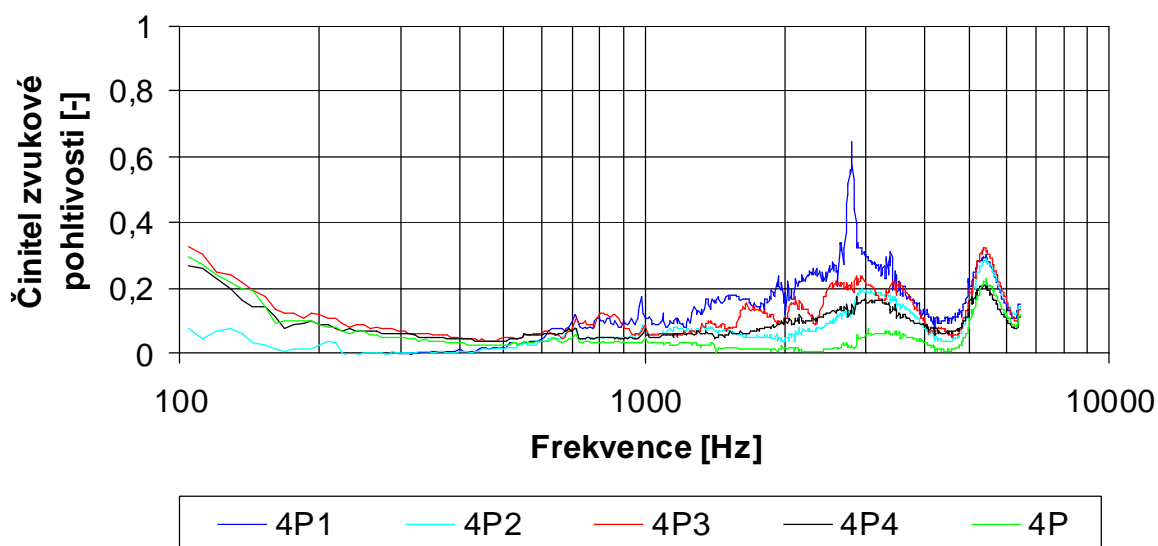
Obrázek 57: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření papírových mezikruží 1 vrstvy se zvlákněnými nanovrstvami všech plošných hmotností.

### 2P1,2,3,4



Obrázek 58: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření papírových mezikruží s 2 vrstvami se zvlákněnými nanovrstvami všech plošných hmotností.

### 4P1,2,3,4



Obrázek 59: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření papírových mezikruží se 4 vrstvami se zvlákněnými nanovrstvami všech plošných hmotností.

Do tabulek 11 až 13 byly zpracovány maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti a jim odpovídající frekvence odečtené z grafů. Je však nutné brát tyto hodnoty pouze jako orientační údaje. Maximální činitele zvukové pohltivosti byly

odečítány pro všechny plošné hmotnosti. Průběhy těchto křivek se pohybují v nízkých hodnotách činitele zvukové pohltivosti. Závislost činitele zvukové pohltivosti na kmitočtu vykazuje dle [9] v rezonanci soustav vždy své maximum na vlastním kmitočtu soustavy, neboť množství zvukové energie, přeměněné v jinou energii, stoupá s velikostí amplitudy některé z akustických veličin (např. akustická rychlost), a ty mají v rezonanci své maximum. Lze tedy předpokládat, že maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti, uvedené v tabulce 11 až 13, odpovídají rezonančním (vlastním) frekvencím.

**Tabulka 11: Maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti a jim odpovídající frekvence nanovlákněné vrstvy 1., 2., 3. a 4. plošné hmotnosti, zvlákněné na papírová mezikruží 1. tloušťky.**

1P1				1P2			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]	Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,485	1152			0,192	2968		
0,499		2272		-		-	
0,466			2832	-			-

1P3				1P4			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]	Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,216	2944			0,152	3000		

**Tabulka 12: Maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti a jim odpovídající frekvence nanovlákněné vrstvy 1., 2., 3. a 4. plošné hmotnosti, zvlákněné na papírová mezikruží 2. tloušťky.**

2P1				2P2			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]	Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,669	2808			0,163	2840		

2P3				2P4			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]	Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,328	2448			0,16	3224		



**Tabulka 13: Maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti a jim odpovídající frekvence nanovláknenné vrstvy 1., 2., 3. a 4. plošné hmotnosti, zvlákněné na papírová mezikruží 4. tloušťky.**

<b>4P1</b>			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,65	2792		

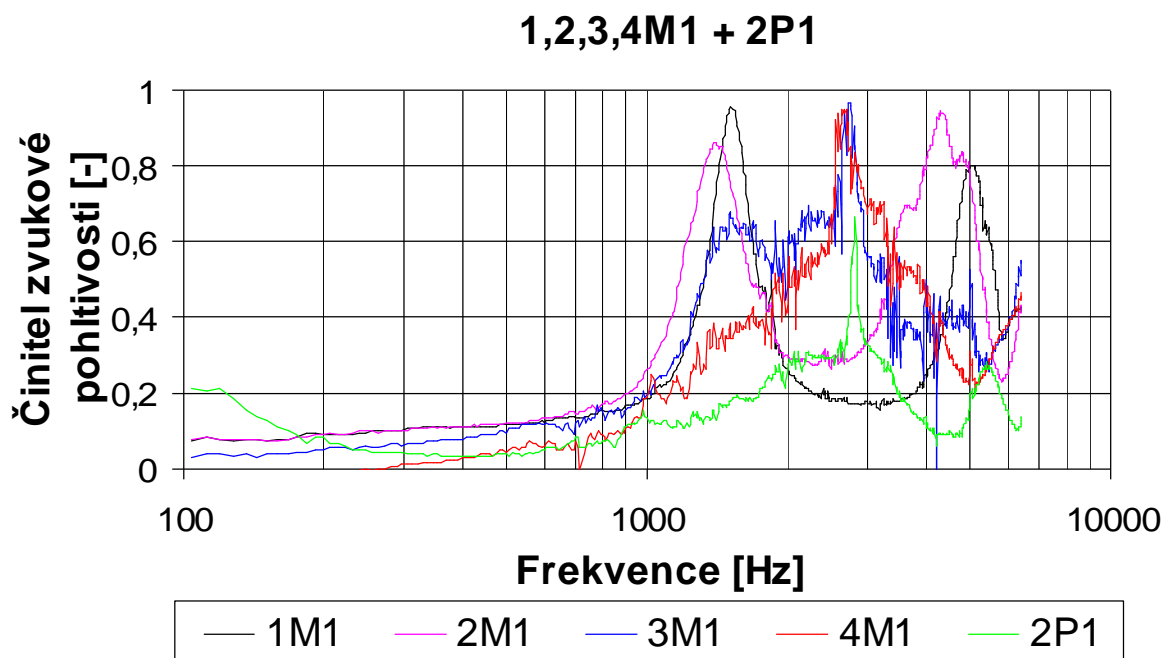
<b>4P2</b>			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,196	2944		

<b>4P3</b>			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,237	2944		

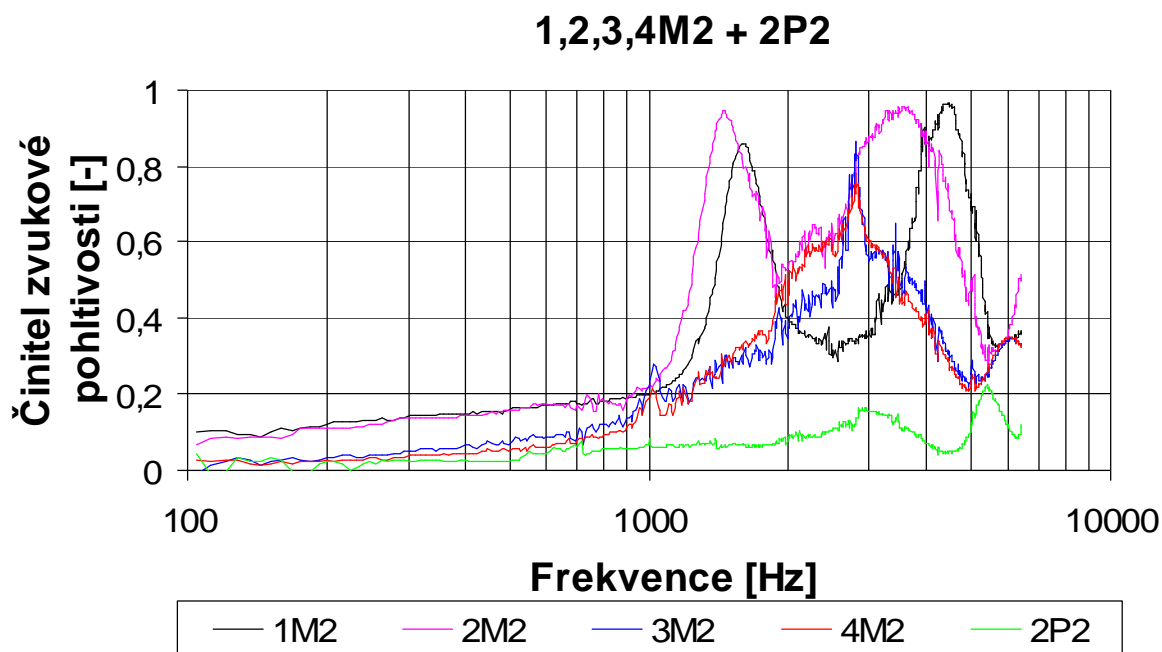
<b>4P4</b>			
Činitel zvukové pohltivosti	1.(f <sub>1</sub> ) [Hz]	2.(f <sub>2</sub> ) [Hz]	3.(f <sub>3</sub> ) [Hz]
0,162	3136		

## 4.5 Porovnání vzorků nanovláknenné vrstvy stejné plošné hmotnosti zvlákněné na mřížky a papírová mezikruží

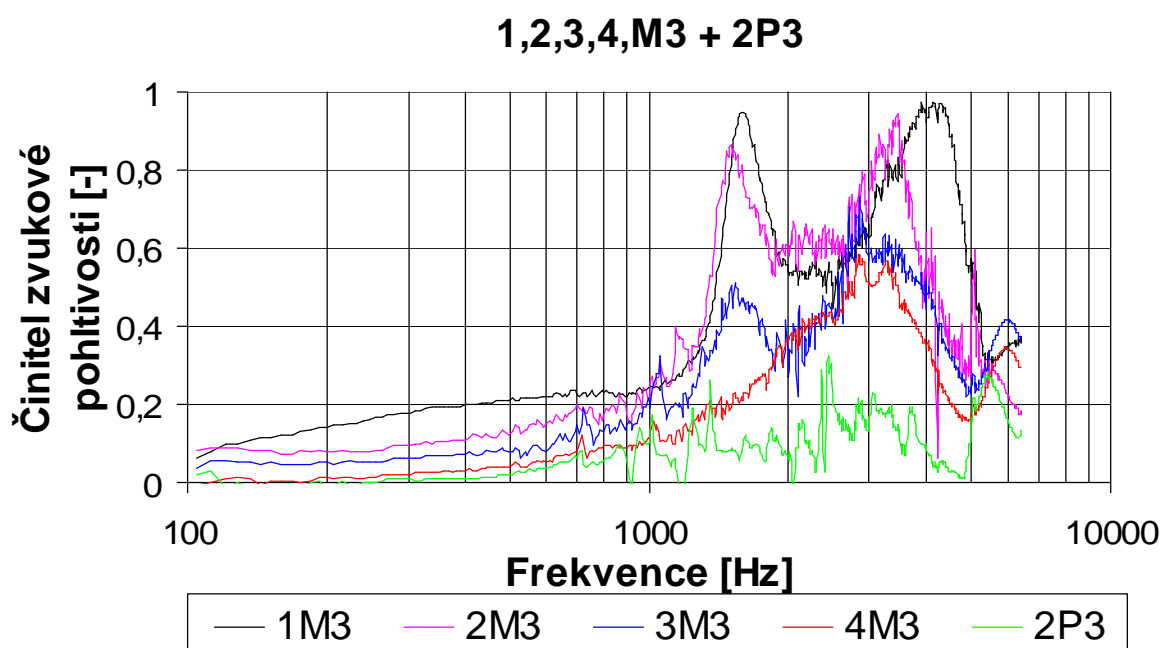
Na papírové mezikruží lze pohlížet jako na mřížku s maximální velikostí ok. Aby mohly být porovnány stejné nebo alespoň co nejvíce se k sobě blížíící tloušťky mřížové tkaniny a papíru, byly u všech vzorků změřeny tloušťky, a na základě těchto výsledků byla k porovnávání s mřížemi zvolena papírová mezikruží, složená ze dvou vrstev papíru. Zjištěné údaje o tloušťkách jsou uvedeny v tab. 16 až 17. Jak je patrné z obr. 60 až 63, tento předpoklad se potvrdil jen z části. U první plošné hmotnosti nanovrstvy, zvlákněné na papírová mezikruží 2. tloušťky, je jasné patrné pokračování trendu tvaru křivek, který je patrný u třetí a čtvrté velikosti ok mřížové tkaniny, v podobě jednoho maxima v oblasti přibližně 2800 Hz. V případě ostatních plošných hmotností se však tato charakteristika již nijak zřetelně neprojevuje, lze pozorovat jen velmi slabý náznak maxima v oblasti kolem 3000 Hz u nanovrstvy druhé a čtvrté plošné hmotnosti. V případě třetí plošné hmotnosti nanovrstvy lze pozorovat neurčité kmitání v širokém pásu od 1000 do 5000 Hz. Zdůvodnění pro tyto jevy lze nejpravděpodobněji hledat v již ne tak účinných nanovrstvách, slabších než je nanovrstva nejvyšší plošné hmotnosti, vykazující nejlepší výsledky.



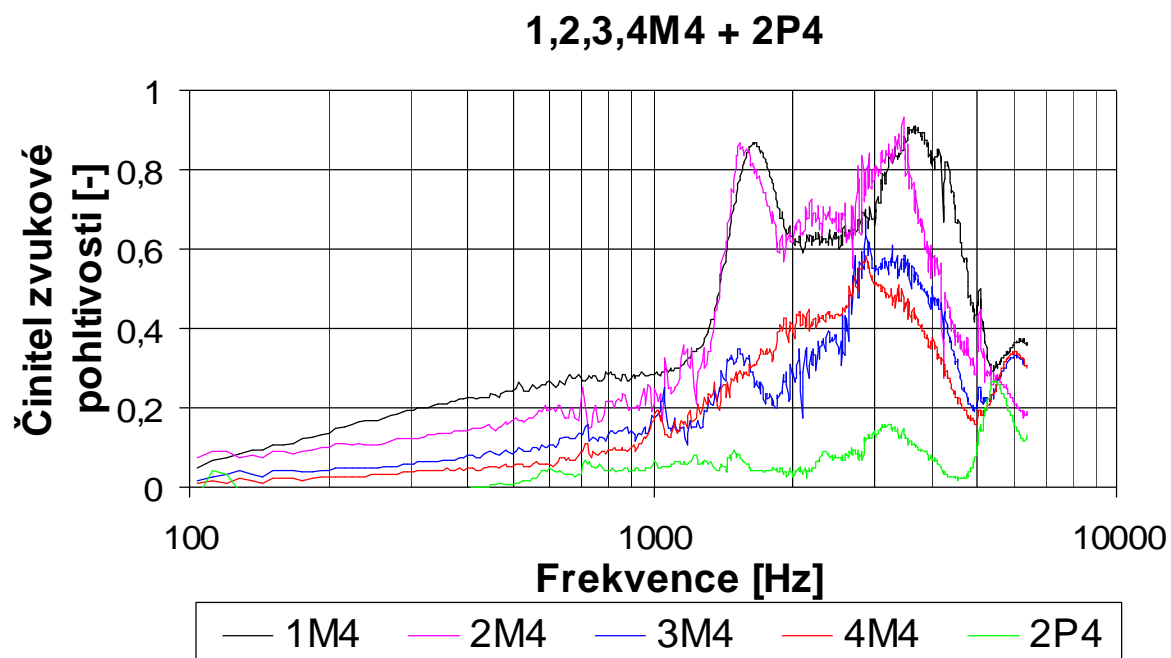
Obrázek 60: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření papírových mezikruží 2. tloušťky, a při měření mřížky s 1. 2. 3. a 4. velikostí ok se zvlákněnými nanovrstvami nejvyšší plošné hmotnosti ( $5,7 \text{ g.m}^{-2}$ ).



Obrázek 61: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření papírových mezikruží 2. tloušťky, a při měření mřížky s 1. 2. 3. a 4. velikostí ok se zvlákněnými nanovrstvami druhé plošné hmotnosti ( $2,5 \text{ g.m}^{-2}$ ).



Obrázek 62: Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření papírových mezikruží 2. tloušťky, a při měření mřížky s 1. 2. 3. a 4. velikostí ok se zvlákněnými nanovrstvami třetí plošné hmotnosti ( $2,2 \text{ g.m}^{-2}$ ).



**Obrázek 63:** Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření papírových mezikruží 2. tloušťky, a při měření mřížky s 1. 2. 3. a 4. velikostí ok se zvlákněnými nanovrstvami nejnižší čtvrté plošné hmotností ( $1,7 \text{ g.m}^{-2}$ ).

## 5. Závěr

Tato práce studovala chování nanovrstvy podrobené působení zvukových vln. Měření činitele zvukové pohltivosti bylo prováděno na vzorcích, zhotovených elektrostatickým zvlákněním nanovláknenné vrstvy na mřížky ze skleněných vláken s různou velikostí ok (obr. 29) a na papírová mezikruží o různých tloušťkách (obr. 30). Membrána, tvořená nanovláknennou vrstvou o plošných hmotnostech 5,7; 2,6; 2,2; 1,7 g.m<sup>-2</sup>, byla umístěna v konstantní vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny.

Měření zvukové pohltivosti nanovláknenných vrstev vždy o stejných plošných hmotnostech, nanesených na mřížkách s různou velikostí ok (obr. 32), bylo zjištěno, že nanovláknenná vrstva, nanesená na mřížky s menšími oky, lépe tlumí frekvence v oblasti přibližně 1500 Hz a od 4000 do 5000 Hz, zatímco nanovláknenná vrstva, nanesená na mřížky s většími oky, lépe tlumí frekvence od 2500 do 3000 Hz (obr. 43 až 46). U všech grafů všech měření se v oblasti frekvencí nad 5500 Hz objevují téměř shodné průběhy křivek v podobě mírného zvlnění, což lze vysvětlit vlivem geometrie samotné impedanční trubice. Do tab. 7 až 10 byly zpracovány maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti a jim odpovídající frekvence, odečtené z grafů.

Měření zvukové pohltivosti nanovláknenných vrstev o různých plošných hmotnostech, nanesených na mřížkách se stejnou velikostí ok, bylo zjištěno, že se stoupající plošnou hmotností je patrný posun maxim křivek k nižším frekvencím (nejvyšší plošná hmotnost 1M1 a nejnižší 1M4). S rostoucí plošnou hmotností křivky rostou rychleji, a dosahují vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti (obr. 48 až 51). K určitému odchýlení došlo u křivky odpovídající druhé plošné hmotnosti v oblasti od 1000 do 2000 Hz, což mohlo být způsobeno manipulací se vzorky nebo nestejnou měrností při výrobě nanovláknenné vrstvy.

Pro zjištění vlivu různé tloušťky mezikruží s nanosenou nanovláknennou vrstvou (obr. 31) na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti bylo po předchozích experimentech zvoleno mezikruží papírové. Kladívkové papíry byly použity jednak v jedné základní vrstvě, a jednak byly dále vrstveny lepením, a to 2 ks a 4 ks na sebe.

Z grafů křivek průběhů zvukové pohltivosti nanovláknenné vrstvy zvlákněné na papírová mezikruží o různých tloušťkách však jednoznačné vrcholy vyčíst nelze, dosahují pouze určitých maximálních hodnot, relativně nízkých a nevýrazných, oproti nanovrstvám, zvlákněným na mřížky s různou velikostí ok (viz obr. 52 až 55). Nelze

jednoznačně konstatovat vliv tloušťky mezikruží na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti.

V dalším měření byl zkoumán vliv různé plošné hmotnosti nanovrstvy, zvlákněné na papírová mezikruží, o stejné tloušťce na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti. Z grafu obr. 57 až 59 je patrné, že křivka, příslušející první plošné hmotnosti, dosahuje oproti zbylým třem vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti bez ohledu na tloušťku použitého papírového mezikruží. Jako vysvětlení tohoto jevu se nabízí lepší absorpční schopnost nanovrstvy 1. největší plošné hmotnosti ( $5,7 \text{ g.m}^{-2}$ ). V případě třetí plošné hmotnosti nanovrstvy lze pozorovat neurčité kmitání v širokém pásu od 1000 do 5000 Hz. Průběhy křivek, odpovídající druhé a čtvrté plošné hmotnosti, se pohybují ve velmi nízkých hodnotách činitele zvukové pohltivosti. Nelze jednoznačně konstatovat vliv plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy na maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti.

Porovnání vzorků nanovlákněné vrstvy stejné plošné hmotnosti, zvlákněné na mřížky a mezikruží, je znázorněno na obr. 60 až 63. Na mezikruží lze pohlížet jako na mřížku s maximální velikostí ok. U první plošné hmotnosti nanovrstvy, zvlákněné na mezikruží 2. tloušťky (viz tab. 16 až 17), je jasně patrné pokračování trendu průběhu křivek, který je patrný u třetí a čtvrté velikosti ok skleněné tkaniny, v podobě jednoho maxima v oblasti přibližně 2800 Hz. V případě ostatních plošných hmotností se však tato charakteristika již nijak zřetelně neprojevuje.

#### Doporučení:

Pro další studium dané problematiky autorka této práce doporučuje:

- Ø zkoumání různých materiálů mezikruží i jejich rozměrů, především jejich tloušťky,
- Ø zhotovit vzorky vždy jen s jedním okem, požadované velikosti,
- Ø zvýšení plošné hmotnosti (vzhledem k minimální možné rychlosti posuvu odváděcího pásu je nutno použít několika průchodů Nanospiderem), s cílem dosažení posunu maxima zvukové pohltivosti směrem k nižším frekvencím, a zvýšení maximální hodnoty činitele pohltivosti,
- Ø protože nebylo možné stanovit radiálně působící napínací sílu, vývoj by proto mohl postupovat tak, aby mohla být tato veličina určena.

## 6. Seznam použité literatury

Citace literárních zdrojů byl proveden podle ČSN ISO 690.

- [1] SVOBODA, E. a kol.: *Přehled středoškolské fyziky*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1996. ISBN 80-7196-116-7.
- [2] KUTMAN, O.: *Fyzika II – Akustika*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1991. IBSN 80-01-00655-7.
- [3] *Akustika*. [online] [cit. 7.8. 2007] Dostupné na World Wide Web:  
<[http://homen.vsb.cz/%7Eber30/texty/varhany/anatomie/pistaly\\_akustika.htm](http://homen.vsb.cz/%7Eber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm)>
- [4] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.: *Fyzika – Mechanika – Termodynamika*. 2. dotisk 1. českého vyd. Praha: VUT v Brně, Nakladatelství VUTIUM a Prometheus, 2006. ISBN 80-214-1868-0 (VUTIUM), ISBN 81-7196-213-9 (Prometheus).
- [5] MECHLOVÁ, E. ; KOŠTÁL, K.: *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz*. 1. vyd. Praha: Prométheus, 1999. ISBN 80-7196-151-5
- [6] *Pojmy - bílý šum*. [online] [cit. 7.8. 2007] Dostupné na World WideWeb:  
<<http://home.zcu.cz/~futtera/technol/pojmy.htm>>
- [7] *Nucené kmitání, rezonance*. [online] [cit. 7.8. 2007] Dostupné na World Wide Web:  
<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezonan%C4%8Dn%C3%AD\\_k%C5%99ivka](http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezonan%C4%8Dn%C3%AD_k%C5%99ivka)>
- [8] BERANEK, L. L.: *Snižování hluku*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. ISBN 04-024-65.
- [9] KOLMER, F.; KYNCL, J.: *Prostorová akustika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. ISBN 04-514-80.
- [10] KALINOVÁ, K.: *Zvuková pohltivost vláknenných materiálů s ohledem na charakteristiky struktury*. /Disertační a habilitační práce/, Liberec: TU v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-997-X.
- [11] *Akustické parametry*. [online] [cit. 8. 8. 2007] Dostupné na World Wide Web:  
<<http://europe.usg.com/usgcz/techacoustic.htm>>
- [12] ŠKVOR, Z.: *Akustika a elektroakustika*. 1. vyd. Praha: Akademie věd České republiky, 2001. ISBN 80-200-0461-0.

- [13] Brüel & Kjaer.: *Measurements in Building Acoustics*. [online] [cit. 28. 8. 2007]  
Dostupné na World Wide Web:  
<[http://www.bksv.com/pdf/Measurements\\_in\\_Building\\_Acoustics.pdf](http://www.bksv.com/pdf/Measurements_in_Building_Acoustics.pdf)>
- [14] Brüel & Kjaer.: *Sound & Vibration Measurement*. Technical Documentation.
- [15] Brüel & Kjaer.: *Sound & Vibration Measurement* [online] [cit. 29.7.07]  
Dostupné na World Wide Web: <[http://www.ksd.vslib.cz/skolici\\_pracoviste/](http://www.ksd.vslib.cz/skolici_pracoviste/)>
- [16] *History of nanotechnology*. [online] [cit. 29.7.07] Dostupné na World Wide Web: <[http://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_nanotechnology](http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_nanotechnology)>
- [17] RŮŽIČKOVÁ, J.: *Elektrostatické zvlákňování nanovláken*. 1.vyd., Liberec: TUL 2004. Fakulta textilní. ISBN 80-7083-867-1
- [18] JIRSÁK, O. a kolektiv: *Výroba a vlastnosti nanovláken*. [online] [cit. 29.7.07]  
Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ft.tul.cz/depart/knt>>
- [19] FORMHALS, A. US patent 1,975,504, 1934.
- [20] FORMHALS, A. US patent 2,160,962, 1939.
- [21] FORMHALS, A. US patent, 2,187,306, 1940.
- [22] FORMHALS, A. US patent, 2,323,025, 1943.
- [23] FORMHALS, A. US patent, 2,349,950, 1944
- [24] *Electrospinning*. [online] [cit. 6.8.07] Dostupné na World Wide Web:  
<<http://www.che.vt.edu/Wilkes/electrospinning/electrspinning.html>>
- [25] DUCHÁČEK, V.: *Polymery, výroba, vlastnosti, zpracování použití*. 1. vyd., Praha: VŠCHT 2006. ISBN 80-7080-617-6. [online] [cit. 6.8.07] Dostupné na World Wide Web: <[http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_isbn-80-7080-617-6/pages-img/003.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pages-img/003.html)>
- [26] ZWIKKER, C.; KOSTEN, C. W.: *Sound absorbing materiále*. [online] [cit. 2.11.07] Dostupné na World Wide Web:  
<[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V1S-3X64VV9-4&\\_user=640831&\\_coverDate=01%2F31%2F2000&\\_alid=545461418&\\_rdoc=1&\\_fmt=full&\\_orig=search&\\_cdi=5682&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_ct=2&\\_acct=C000034259&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=640831&md5=11abcbdae66018772160181156b598708](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V1S-3X64VV9-4&_user=640831&_coverDate=01%2F31%2F2000&_alid=545461418&_rdoc=1&_fmt=full&_orig=search&_cdi=5682&_sort=d&_docanchor=&view=c&_ct=2&_acct=C000034259&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640831&md5=11abcbdae66018772160181156b598708)>



- [27] SHOSHANI, Y.; YAKUBOV, Y.: *Numerical assessment of maximal absorption coefficients for nonwoven fiberwebs*. [online] [cit. 2.11.07] Dostupné na World Wide Web: <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V1S-3X64VV9-4&\\_user=640831&\\_coverDate=01%2F31%2F2000&\\_alid=545461418&\\_rdoc=1&\\_fmt=full&\\_orig=search&\\_cdi=5682&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_ct=2&\\_acct=C000034259&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=640831&md5=11abcbdae66018772160181156b598708](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V1S-3X64VV9-4&_user=640831&_coverDate=01%2F31%2F2000&_alid=545461418&_rdoc=1&_fmt=full&_orig=search&_cdi=5682&_sort=d&_docanchor=&view=c&_ct=2&_acct=C000034259&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640831&md5=11abcbdae66018772160181156b598708)>
- [28] ZWIKKER, C.; KOSTEN, C. W.; EIJKEN V.d.: *Absorption of sound by porous material I-V*. [online] [cit. 7.9.07] Dostupné na World Wide Web: <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6X42-4D8DHK4-53&\\_user=640831&\\_coverDate=02%2F28%2F1941&\\_alid=628565689&\\_rdoc=4&\\_fmt=summary&\\_orig=search&\\_cdi=7314&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_ct=4&\\_acct=C000034259&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=640831&md5=68eeff5487c0944ec10ecaf1f67c6369#hit3](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6X42-4D8DHK4-53&_user=640831&_coverDate=02%2F28%2F1941&_alid=628565689&_rdoc=4&_fmt=summary&_orig=search&_cdi=7314&_sort=d&_docanchor=&view=c&_ct=4&_acct=C000034259&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640831&md5=68eeff5487c0944ec10ecaf1f67c6369#hit3)>
- [29] KOSTEN C. W.; JANSEN, J. H.: *Acoustic properties of flexible and porous amterials*. [online] [cit. 8.9.07] Dostupné na World Wide Web: <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleListURL&\\_method=list&\\_ArticleListID=593703106&\\_sort=d&view=c&\\_acct=C000034259&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=640831&md5=a6d044a59297759174a25acff14caa7d](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=593703106&_sort=d&view=c&_acct=C000034259&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640831&md5=a6d044a59297759174a25acff14caa7d)>
- [30] DAHL, M. D.; RICE, E. J.; GROESBECK, D. E.: *Effects of fiber motion on the acoustical behavior of an anisotropic, flexible fibrous material*. [online] [cit. 9.7.07] Dostupné na World Wide Web: <<http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=JASMAN0000810000S1000S26000004&idtype=cvips&gifs=yes>>
- [31] JAYARAMAN, K. A.: *Acoustical absorptive properties of Nonwovens*. The Graduate Faculty of North Carolina State University, 2005. [online] [cit. 9.7.07] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.tx.ncsu.edu/ncrc/acrobatfiles/Thesis/Jayaraman.pdf>>
- [32] FELLERT, J.; Boras.: *Malta na vrchní stranu omítky určená jako vrstva absorbující zvuk a odolná proti ohni*. Původce vynálezu: BERGLUND P. Int. C 04 B 28/02. Švédsko.

- [33] WILSON ACOUSTIX GmbH.: *Multi-layered porous sound-absorber*. Původce vynálezu: DONNER, U.; WILSON, W.; SCHADE, S.: Int. G10K11/162. Německo.
- [34] DEDA DI C DEFILIPPI E C S A S: *Acoustically active board of textile material*. Původce vynálezu: DEFILIPPI C. Int. E04B1/86. Itálie.
- [35] METZELER SCHAUM GmbH.: *Zařízení pro tlumení hluku*. Původce vynálezu: METZELER, S. Int. E 04 B 1/86. Německo.
- [36] LEE, Y. Y.; LEE, E. W. M.: *Widening the sound absorption bandwidths of flexible micro-perforated curved absorbers using structural and acoustic resonance*. [online] [cit. 9.10.07] Dostupné na World Wide Web:   
<[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V49-4N1T1VN-2&\\_user=640831&\\_coverDate=08%2F31%2F2007&\\_alid=633330351&\\_rdoc=12&\\_fmt=summary](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V49-4N1T1VN-2&_user=640831&_coverDate=08%2F31%2F2007&_alid=633330351&_rdoc=12&_fmt=summary)>
- [37] DIAS, T.; MONARAGAL, R.: *Sound absorbtion in knitted structures for interior noise reduction in automobiles*. [online] [cit. 9.10.07] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-0233/17/9/018/>>
- [38] DIAS, T.; MONARAGAL, R.; LAY, E.: *Analysis of thick spacer fabrics to reduce automobile interior noise*. [online] [cit. 9.10.07] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-0233/18/7/026/>>
- [39] ŽIKOVSKÝ, J.; BEZDĚK, P.; ZEIFL, K.: *Porézní nehořlavý podhledový panel se zvukoabsorpčními účinky*. Původce vynálezu: ŽIKOVSKÝ, J.; BEZDĚK, P.; ZEIFL, K.: Int E04B1/86. Česká republika.
- [40] MUELLER, U.: *Woven laminate as a covering for sound absorption of input and output sound absorbers and metod for producing an a acoustic isolation unit*. [online] [cit. 9.10.07] Dostupné na World Wide Web:   
<<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=WO2007062781&F=0>>
- [41] HANNA, Y. I.; KANDIL, M. M.: *Sound absorbing double curtains from local textile materiále*. [online] [cit. 9.10.07] Dostupné na World Wide Web:   
<[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V1S-480V140-FJ&\\_user=640831&\\_coverDate=12%2F31%2F1991&\\_rdoc=1&\\_fmt=&\\_orig=search&\\_sort=d&view=c&\\_acct=C000034259&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=640831&md5=cc8e4fd314e27ec67b8bfe702f0da200](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V1S-480V140-FJ&_user=640831&_coverDate=12%2F31%2F1991&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000034259&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640831&md5=cc8e4fd314e27ec67b8bfe702f0da200)>

- [42] WANG, X.: *An Optimization Model for Fibrous Metal Foam Sound Absorbers*. [online] [cit. 9.10.07] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.wcsmo6.org/papers/6451.pdf>>
- [43] GIALAMAS, P.; MANOLAS D. A.; TSAHALIS D. T.: *Development of a Matlab code based on a weak formulation of wave propagation through a porous material: comparison with experimental results*. [online] [cit. 9.10.07] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.emeraldinsight.com/Insight/viewContentItem.do?contentType=Article&hdAction=lnkhtml&contentId=1454790>>
- [44] CHUN, D. H.; CHANG, H. J.: *A study on the sound absorption properties of nonwoven products with panel type absorber*. [online] [cit. 9.10.07] Dostupné na World Wide Web: <<http://www2.rieta.or.kr/zi-zi-ba/zero/data/256.pdf>>
- [45] YAMAHA CORP: *Method for measuring sound absorption power of a theater chair with a human being seated thereon and a dummy sound absorber*. Původce vynálezu: TAKESHI, S.; KAWAKAMI, F. Int. G01H17/00. Japonsko.
- [46] ŠNEJDÁREK, I.; ŽIKOVSKÝ J.: *Zvukoabsorpční závěsná soustava*. Původce: ŠNEJDÁREK, I.; ŽIKOVSKÝ J. Int. E 04 B 1/86. Česká Republika.
- [47] MIPO CHEMICALS CO., LTD.: *Hliníkový rám, jehož dutá část je vyplněna tepelně izolační pěnou, způsob a zařízení pro jeho výrobu, a způsob řízení tohoto zařízení*. Původce: TAE, Y. K. Int. E 06 B 3/263. Jižní Korea.
- [48] ZVVZ A. S.: *Nízkofrekvenční tlumič hluku*. Původce: neuveden Int. F 24 F 13/24 Česká Republika.
- [49] ZORIN, V. A.; IVANCHUK, A. A.; KARCIONS, D. M.; et al.: *Effect of geometric structure parameters on the sound absorbing properties of a metal fiber materiál*. [online] [cit. 3.11.07] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.springerlink.com/content/1l5k637635653264/>>
- [50] CHENA, A. C. F.; Williamse H. L.: *Studies of polymeric systems for absorbing airborne soundpak*. [online] [cit. 3.11.07] Dostupné na World Wide Web: <<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract/104023979>>
- [51] INGARDA, K. U.: *Locally and nonlocally reacting flexible porous layers - A comparison of acoustical properties*. [online] [cit. 3.11.07] Dostupné na World Wide Web: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1980asme.meet.....I>>

- [52] BOLTON *et al.*: *Prediction and optimization method for homogeneous porous material and accoustical systéme*. [online] [cit. 3.11.07] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.freepatentsonline.com/6256600.html>>
- [53] PEŇAZOVÁ, J.: *Využití druhotných surovin pro zvukově pohltivé materiály s nanovláknými vrstvami*. /Bakalářská práce/, Liberec: TUL 2006.
- [54] KRSEK, J.: *Vliv nanovlákné vrstvy na zvukově pohltivé vlastnosti netkaných textilií*. /Diplomová práce/, Liberec: TUL 2005.
- [55] HEJGRLÍKOVÁ, Z.: *Stanovení rezonance nanovlákné vrstvy v závislosti na jejích parametrech*. /Diplomová práce/, Liberec: TUL 2007.
- [56] DLÁBKOVÁ, L.: *Vliv strukturních parametrů na zvukově izolační vlastnosti vlákných materiálů*. /Diplomová práce/, Liberec: TUL 2004.

## **7. Seznam příloh**

### **Příloha 1**

Obrázek 64 až 65 – Snímky struktury řezu vzorku nanovláknenných vrstev plošných hmotností 5,7; 2,5; 2,2 a 1,7 g.m<sup>-2</sup>, nasnímané pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu.

### **Příloha 2**

Složení zvlákněvaného roztoku polyvinylalkoholu.

### **Příloha 3**

Tabulka 14 – Plošná hmotnost papírových mezikruží o různých tloušťkách, měřených v imp. trubici.

### **Příloha 4**

Tabulka 2 – Plošná hmotnost mřížek s různou velikostí ok, měřených v imp. trubici.

### **Příloha 5**

Tabulka 16 – Tloušťky papírových mezikruží s nanosenou nanovrstvou.

### **Příloha 6**

Tabulka 17 – Tloušťky mřížek s nanosenou nanovrstvou.

### **Příloha 7**

Obrázek 66 až 67 – Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření nanovláknenné vrstvy všech plošných hmotností, zvlákněné na mřížku s 1. a 2. velikostí ok, měřeno na 5ti vzorcích.

### **Příloha 8**

Obrázek 68 až 69 – Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření nanovláknenné vrstvy všech plošných hmotností, zvlákněné na mřížku s 3. a 4. velikostí ok, měřeno na 5ti vzorcích.

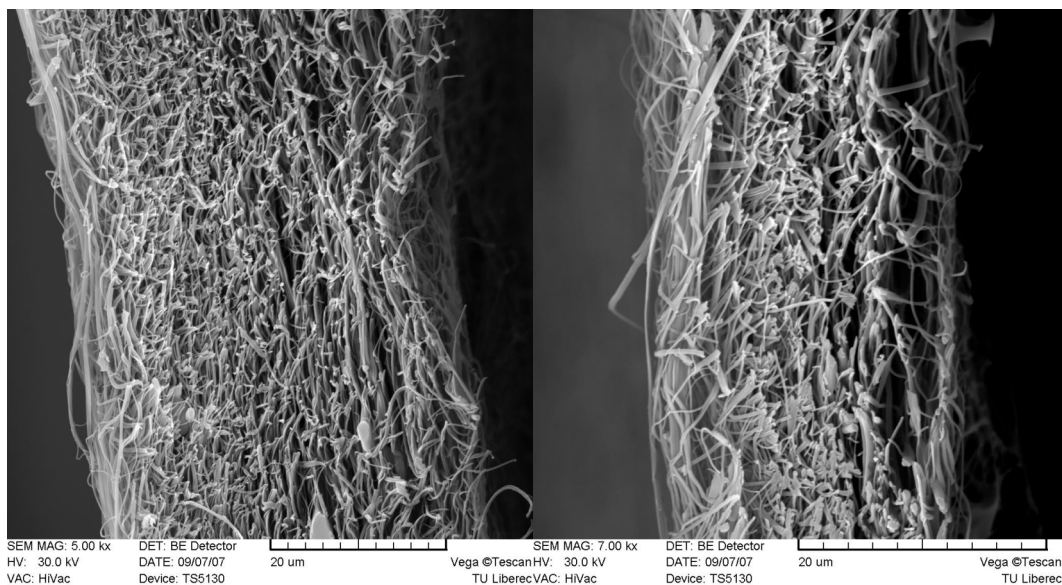
### **Příloha 9**

Obrázek 70 až 71 – Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření nanovláknenné vrstvy všech plošných hmotností, zvlákněné na papírová mezikruží 1. a 2. tloušťky, měřeno na 5ti vzorcích.

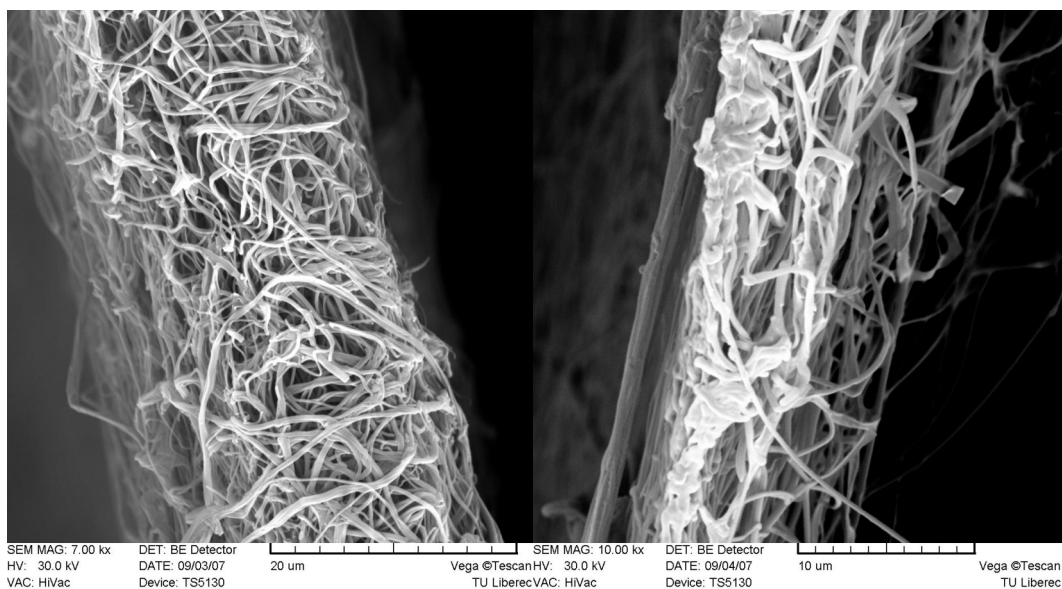
### **Příloha 10**

Obrázek 72 – Průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci, získaný při měření nanovláknenné vrstvy všech plošných hmotností, zvlákněné na papírová mezikruží 4. tloušťky, měřeno na 5ti vzorcích.

## Příloha 1



**Obrázek 64: Snímky struktury řezu vzorku nanovláknenné vrstvy, nasnímané pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. První snímek přísluší plošné hmotnosti  $5,7 \text{ g.m}^{-2}$ , druhý pak plošné hmotnosti  $2,5 \text{ g.m}^{-2}$ .**



**Obrázek 65: Snímky struktury řezu vzorku nanovláknenné vrstvy, nasnímané pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu. První snímek přísluší plošné hmotnosti  $2,2 \text{ g.m}^{-2}$ , druhý pak plošné hmotnosti  $1,7 \text{ g.m}^{-2}$ .**

## Příloha 2

Složení zvlákněvaného roztoku polyvinylalkoholu:

- Ø 1 l .....Polyvinylalkohol (16%)
- Ø 9,6 ml .....Glyoxal (40%)
- Ø 5 ml .....H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> – Kyselina fosforečná (85%)
- Ø 250 ml .....H<sub>2</sub>O – Destilovaná voda

### Příloha 3

**Tabulka 14: Plošná hmotnost papírových mezikruží o různých tloušťkách, měřených v impedanční trubici.**

Vzorek	1P [g]	2P [g]	4P [g]
a	0,029	0,062	0,138
b	0,028	0,063	0,138
c	0,029	0,063	0,137
d	0,028	0,062	0,137
e	0,029	0,062	0,138
Průměrná hodnota [g.m <sup>-2</sup> ]	198,3	434,3	957,1
Směrodatná odchylka [g.m <sup>-2</sup> ]	0,055	0,055	0,055



## Příloha 4

**Tabulka 15: Plošná hmotnost mřížek s různou velikostí ok,  
měřených v impedanční trubici.**

Vzorek	1M [g]	2M [g]	3M [g]	4M [g]
a	0,123	0,104	0,064	0,053
b	0,123	0,102	0,065	0,054
c	0,124	0,101	0,065	0,053
d	0,123	0,103	0,062	0,054
e	0,125	0,102	0,063	0,055
Průměrná hodnota [g.m <sup>-2</sup> ]	153,6	127,1	79,1	67,0
Směrodatná odchylka [g.m <sup>-2</sup> ]	0,089	0,114	0,017	0,084

## Příloha 5

**Tabulka 16: Tloušťky papírových mezikruží s nanosenou nanovláknennou vrstvou.**

Vzorek	1P1[mm]	2P1[mm]	4P1[mm]
a	0,28	0,58	1,16
b	0,27	0,56	1,19
c	0,27	0,58	1,14
d	0,29	0,60	1,19
e	0,27	0,57	1,19
Průměrná hodnota [mm]	0,276	0,578	1,174
Směrodatná odchylka [mm]	0,008	0,015	0,023

Vzorek	1P2[mm]	2P2[mm]	4P2[mm]
a	0,28	0,58	1,15
b	0,28	0,57	1,19
c	0,27	0,57	1,17
d	0,27	0,58	1,16
e	0,27	0,58	1,17
Průměrná hodnota [mm]	0,274	0,576	1,168
Směrodatná odchylka [mm]	0,005	0,005	0,015

Vzorek	1P3[mm]	2P3[mm]	4P3[mm]
a	0,26	0,56	1,14
b	0,26	0,58	1,15
c	0,26	0,57	1,13
d	0,27	0,57	1,16
e	0,27	0,56	1,14
Průměrná hodnota [mm]	0,264	0,568	1,144
Směrodatná odchylka [mm]	0,005	0,008	0,011

Vzorek	1P4[mm]	2P4[mm]	4P4[mm]
a	0,27	0,53	1,12
b	0,26	0,53	1,15
c	0,26	0,55	1,14
d	0,27	0,54	1,12
e	0,26	0,53	1,14
Průměrná hodnota [mm]	0,264	0,536	1,134
Směrodatná odchylka [mm]	0,005	0,009	0,013

## Příloha 6

Tabulka 17: Tloušťky mřížek s různou velikostí ok s nanosenou nanovláknennou vrstvou.

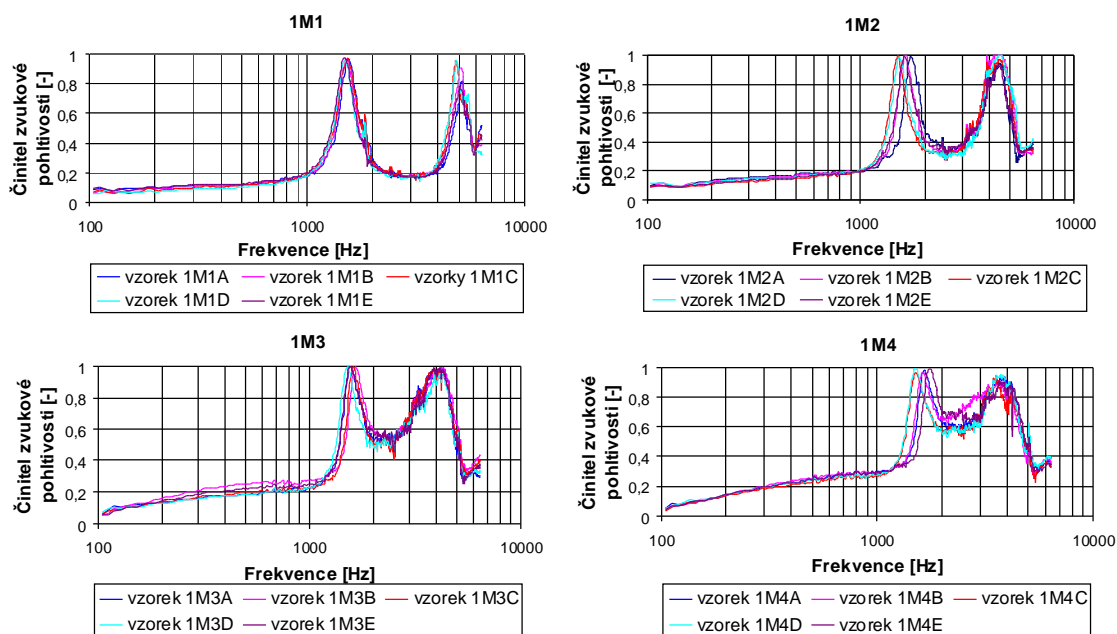
Vzorek	1M1[g]	2M1[g]	3M1[g]	4M1[g]
a	0,49	0,49	0,47	0,47
b	0,48	0,49	0,48	0,49
c	0,48	0,48	0,47	0,47
d	0,47	0,47	0,48	0,47
e	0,48	0,49	0,48	0,48
Průměrná hodnota [mm]	0,480	0,484	0,476	0,476
Směrodatná odchylka [mm]	0,007	0,009	0,005	0,009

Vzorek	1M2[g]	2M2[g]	3M2[g]	4M2[g]
a	0,47	0,48	0,48	0,48
b	0,48	0,49	0,47	0,48
c	0,49	0,47	0,48	0,48
d	0,48	0,48	0,48	0,47
e	0,48	0,47	0,47	0,47
Průměrná hodnota [mm]	0,480	0,478	0,476	0,476
Směrodatná odchylka [mm]	0,007	0,008	0,005	0,005

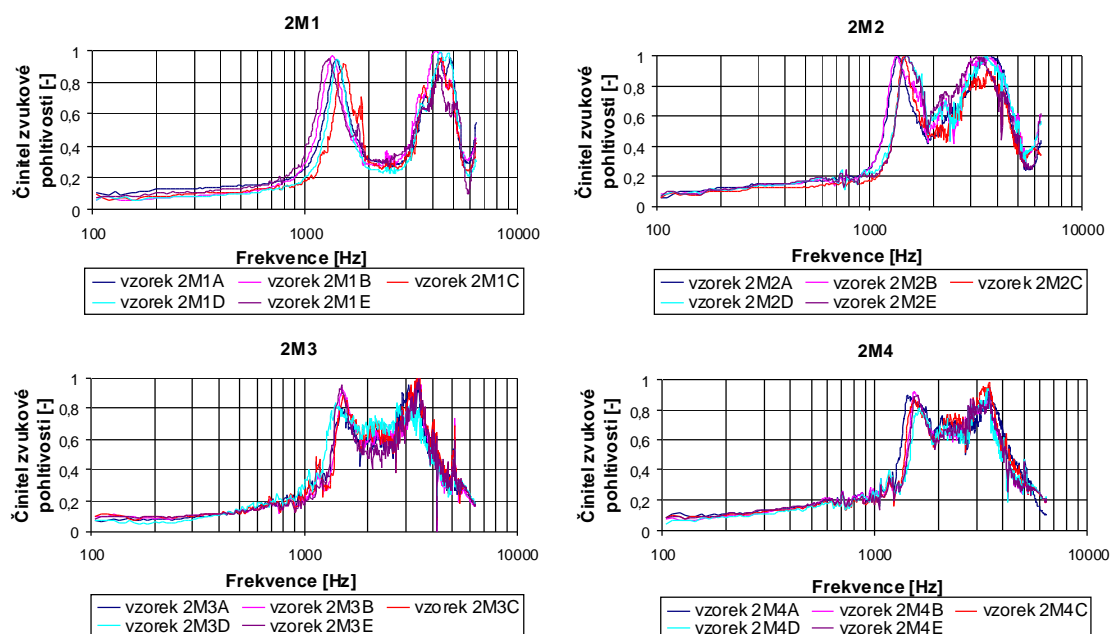
Vzorek	1M3[g]	2M3[g]	3M3[g]	4M3[g]
a	0,48	0,48	0,48	0,48
b	0,48	0,48	0,48	0,48
c	0,47	0,47	0,47	0,47
d	0,48	0,47	0,48	0,47
e	0,47	0,47	0,47	0,48
Průměrná hodnota [mm]	0,476	0,474	0,476	0,476
Směrodatná odchylka [mm]	0,005	0,005	0,005	0,005

Vzorek	1M4[g]	2M4[g]	3M4[g]	4M4[g]
a	0,47	0,47	0,47	0,47
b	0,47	0,48	0,47	0,48
c	0,47	0,47	0,48	0,48
d	0,47	0,48	0,48	0,49
e	0,48	0,48	0,48	0,47
Průměrná hodnota [mm]	0,472	0,476	0,476	0,478
Směrodatná odchylka [mm]	0,004	0,005	0,005	0,008

## Příloha 7

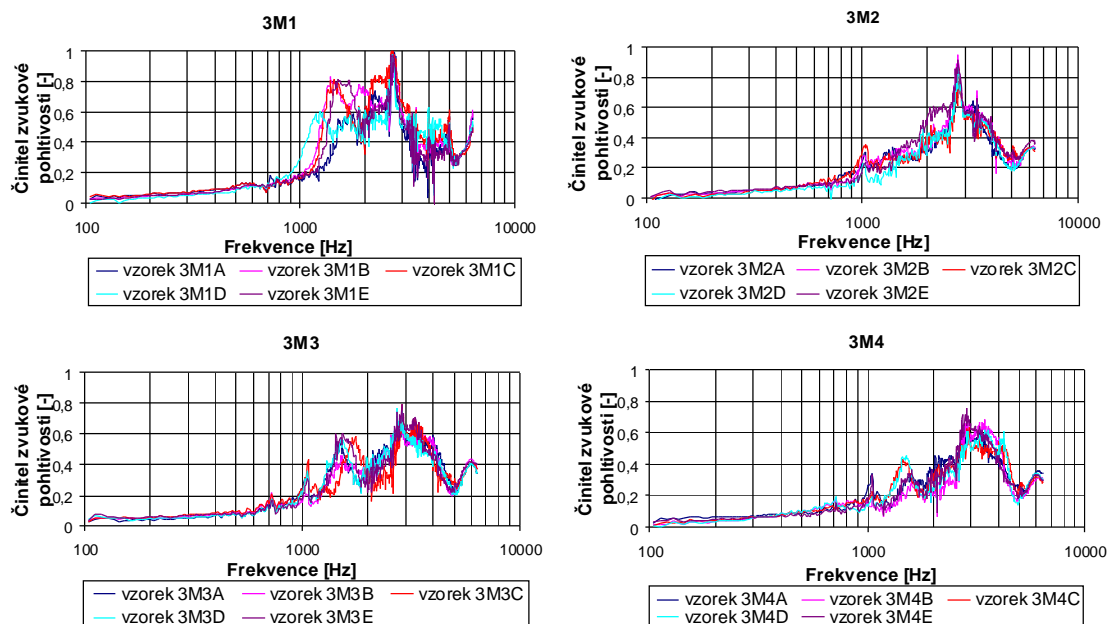


**Obrázek 66:** Průběh číselníku zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci při měření nanovlákněné vrstvy všech plošných hmotností, zvlákněné na mřížku s 1. velikostí ok, měřeno na 5ti vzorcích.

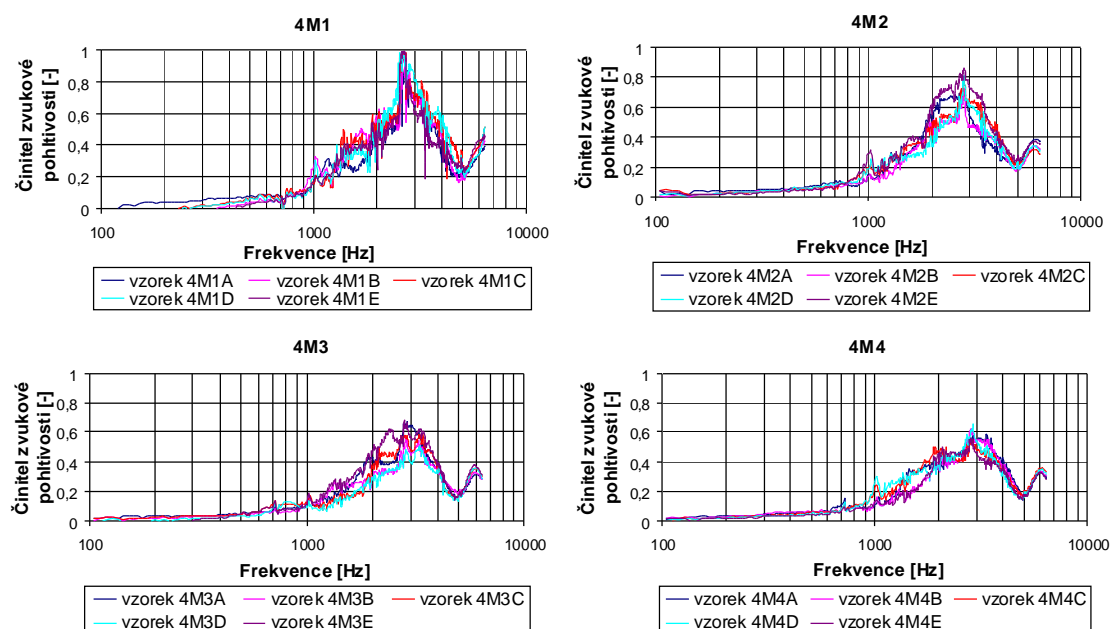


**Obrázek 67:** Průběh číselníku zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci při měření nanovlákněné vrstvy všech plošných hmotností, zvlákněné na mřížku s 2. velikostí ok, měřeno na 5ti vzorcích.

## Příloha 8

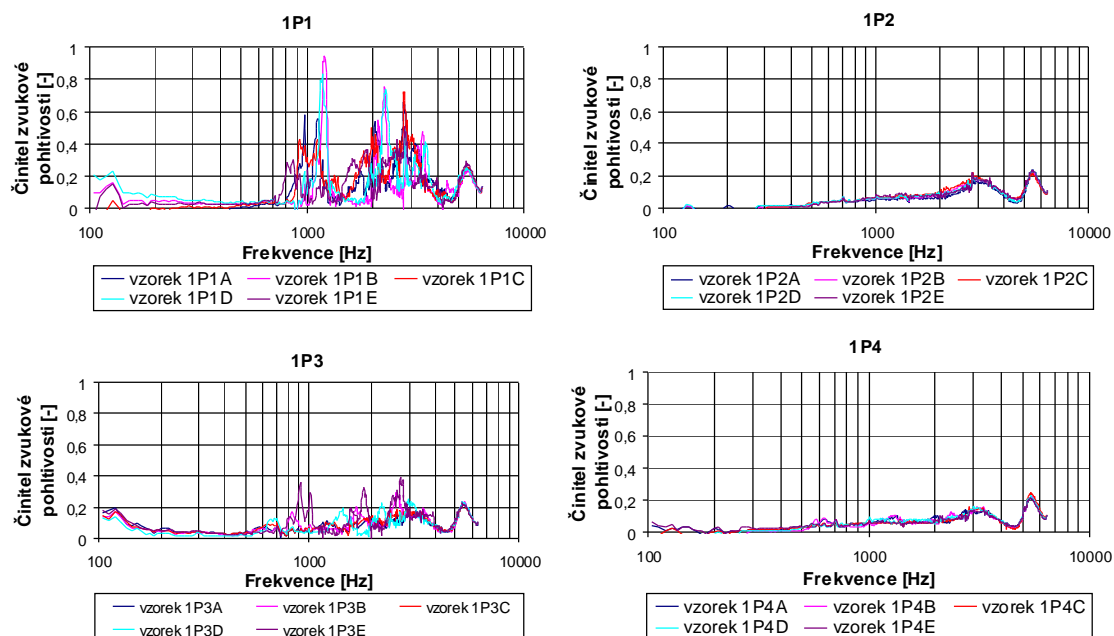


**Obrázek 68:** Průběh číselníku zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci při měření nanovláknenné vrstvy všech plošných hmotností, zvlákněné na mřížku s 3. velikostí ok, měřeno na 5ti vzorcích.

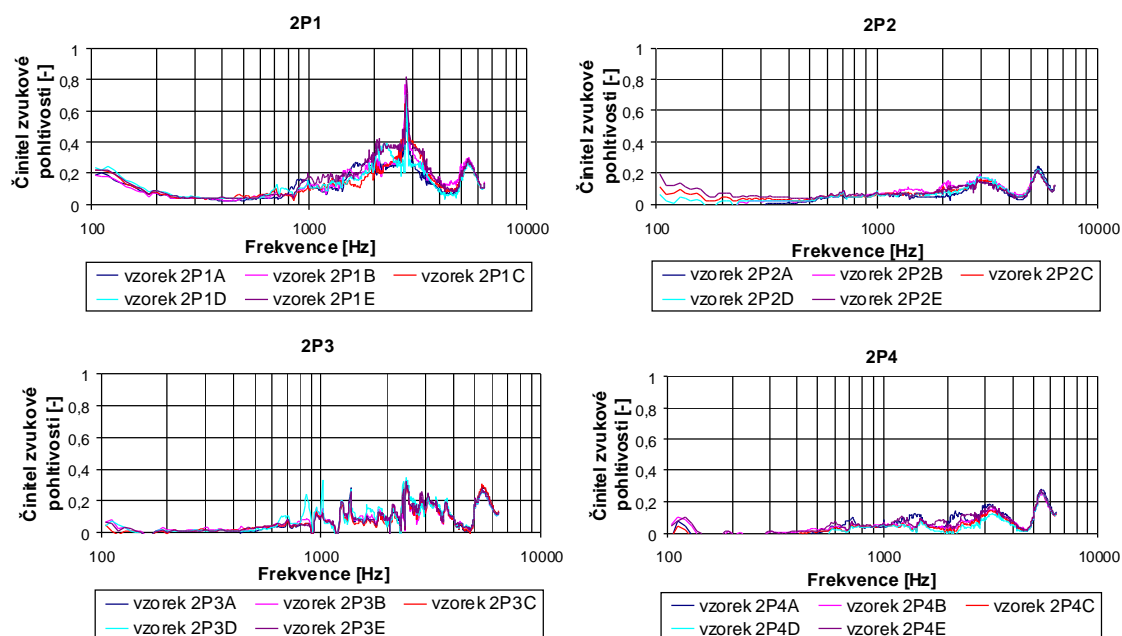


**Obrázek 69:** Průběh číselníku zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci při měření nanovláknenné vrstvy všech plošných hmotností, zvlákněné na mřížku s 4. velikostí ok, měřeno na 5ti vzorcích.

## Příloha 9

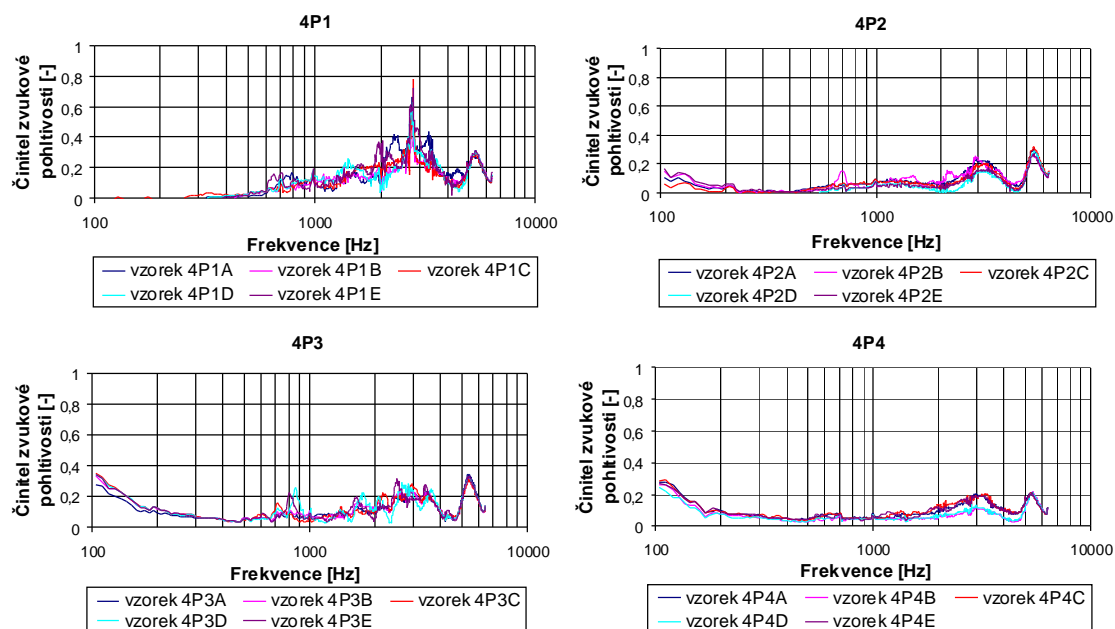


**Obrázek 70:** Průběh číselníku zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci při měření nanovláknenné vrstvy všech plošných hmotností, zvlákněné na papírové mezikruží 1. tloušťky, měřeno na 5ti vzorcích.



**Obrázek 71:** Průběh číselníku zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci při měření nanovláknenné vrstvy všech plošných hmotností, zvlákněné na papírové mezikruží 2. tloušťky, měřeno na 5ti vzorcích.

## Příloha 10



**Obrázek 72: Průběh číselníku zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci při měření nanovlákněné vrstvy všech plošných hmotností, zvlákněné na papírové mezikruží 4. tloušťky, měřeno na 5ti vzorcích.**